

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут"

Електромагнітна техніка

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт
з кредитного модуля “Електромагнітна техніка - 1”

Київ - 2015

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут"

Електромагнітна техніка

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт
з кредитного модуля "Електромагнітна техніка - 1"

Для напряму підготовки 6.050802 – "Електронні пристрої та системи"
всіх форм навчання

Затверджено кафедрою промислової електроніки
НТУУ «Київський політехнічний інститут»

Київ - 2015

Електромагнітна техніка. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з кредитного модуля «Електромагнітна техніка - 1».

Для напряму підготовки 6.050802 – “Електронні пристрої та системи” всіх форм навчання / Уклад.: О.О.Гусєв, В.А.Тодоренко. - К.: НТУУ «КПІ», 2015. - 67с.

Гриф «Рекомендовано» надано Вченою радою факультету електроніки
НТУУ «КПІ»
Протокол № від 22 червня 2015 р.

Навчальне видання

Електромагнітна техніка.

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з кредитного модуля “Електромагнітна техніка - 1”

для напряму підготовки 6.050802 – “Електронні пристрої та системи”
всіх форм навчання

Укладач: *Тодоренко Віктор Агафонович*, канд. техн. наук, доц.
 Гусєв Олександр Олександрович

Вступ

Кредитний модуль “Електромагнітна техніка-1” – є складовою частиною дисципліни “Електромагнітна техніка”, яку включено до вибіркової частини програми бакалаврської підготовки з напрямку підготовки 6.050802 – Електронні пристрої та системи. Курс входить до циклу дисциплін самостійного вибору ВНЗ.

Цей курс є одним з базових і охоплює широке коло пристроїв електронної техніки, які використовують явище магнетизму.

Мета курсу: вивчення фізичних принципів роботи та побудови найбільш розповсюджених електромагнітних пристроїв.

Під час вивчення курсу студенти набувають знань про фізичні основи магнетизму, параметри та характеристики основних магнітних матеріалів, методи розрахунку магнітних ланцюгів, ознайомлюються з основними видами електричних машин, методами вимірювання та регулювання їх параметрів, методами запису та відтворення інформації, які використовують магнітні та магнітооптичні явища.

Курс базується на наступних дисциплінах:

- Математичний аналіз;
- Фізика;
- Теорія електричних кіл;
- Матеріали і компоненти електроніки.

Курс “Електромагнітна техніка” є базовим для наступних дисциплін:

- Пристрої перетворювальної техніки;
- Силові електронні системи;
- Пристрої відображення та реєстрації інформації.

1. Загальні положення

Метою виконання циклу лабораторних робіт є:

- оволодіння вимірювальними приладами, що використовуються при дослідженні магнітного поля та електромагнітних елементів;
- оволодіння методиками розрахунку розгалужених магнітних ланцюгів;
- оволодіння методиками розрахунку та вимірювання індуктивностей розсіювання та власних ємностей статичних феромагнітних пристроїв;
- відпрацювання підходів до вибору матеріалів магнітної техніки для створення типових електромагнітних пристроїв;
- практичне засвоєння методик визначення параметрів та характеристик магнітних матеріалів;
- відпрацювання способів визначення режимів роботи магнітних ланцюгів.

До циклу включено наступні лабораторні роботи.

1. *Лабораторна робота №1* Дослідження постійного магнітного поля.

Розділ 2. Фізичні основи роботи електромагнітних пристроїв.

Тема 2.1 Явище магнетизму. Анізотропія магнітних матеріалів. Доменна структура магнітних матеріалів. Основні магнітні величини та характеристики.

2. *Лабораторна робота №2* Перевірка законів Ома та Кірхгофа у розгалуженому магнітному ланцюзі.

Розділ 2. Фізичні основи роботи електромагнітних пристроїв.

Тема 2.3 Методи розрахунку магнітних кіл. Зв'язок між електричними та магнітними величинами. Принцип дуальності. Моделювання магнітних кіл. Основні закони які використовуються для опису та розрахунку магнітних кіл (закон повного струму, електромагнітної індукції, Ома, Кірхгофа).

3. Лабораторна робота №3 Дослідження характеристик магнітного сердечника.

Розділ 2. Фізичні основи роботи електромагнітних пристроїв.

Тема 2.1 Явище магнетизму. Анізотропія магнітних матеріалів. Доменна структура магнітних матеріалів. Основні магнітні величини та характеристики. Цикли перемагнічування. Втрати в магнітних матеріалах. Явище магнітної в'язкості. Магнітодинамічні та магнітооптичні ефекти. Статичні та динамічні параметри магнітних матеріалів. Динамічні характеристики магнітних матеріалів. Перемагнічування матеріалів імпульсними методами в сильних та слабких полях. Вплив форми та зазору осердя на статичні характеристики.

4. Лабораторна робота №4 Дослідження способів зменшення індуктивності розсіювання.

Розділ 3. Статичні феромагнітні пристрої

Тема 3.2 Трансформатори. Класифікація. Ідеальний трансформатор. Принцип роботи. Схема заміщення двообмоткового трансформатора та її параметри. Розрахунок індуктивності розсіювання. Методи зменшення індуктивності розсіювання. Розрахунок власних ємностей обмоток. Схема заміщення двообмоткового трансформатора для високих частот. Методи експериментального визначення параметрів трансформатора. Основні критерії проектування трансформаторів. Імпульсні трансформатори.

5. Лабораторна робота №5 Дослідження власних ємностей трансформатора.

Розділ 3. Статичні феромагнітні пристрої

Тема 3.2 Трансформатори. Класифікація. Ідеальний трансформатор. Принцип роботи. Схема заміщення двообмоткового трансформатора та її параметри. Розрахунок індуктивності розсіювання. Методи зменшення індуктивності розсіювання. Розрахунок власних ємностей обмоток. Схема заміщення двообмоткового трансформатора для високих частот. Методи

експериментального визначення параметрів трансформатора. Основні критерії проектування трансформаторів. Імпульсні трансформатори.

2. Лабораторна робота №1 Дослідження постійного магнітного поля.

1. Мета роботи

- Ознайомитися з головними величинами, що характеризують магнітне поле, та методами їх визначення.
- Дослідити магнітні поля розгалуженого магнітопроводу та соленоїда.
- Перевірити виконання першого закону Кірхгофа для розгалуженого магнітопроводу.

2. Програма роботи

2.1. Підготовка до роботи.

2.1.1. Ознайомитися з устаткуванням на робочому місці.

2.1.2. Підготувати вимірювач магнітної індукції Ш1-8 до проведення вимірів.

Порядок роботи з вимірювачем описаний в розділі з теоретичними відомостями.

Підготувати до роботи цифровий вольтметр.

2.1.3. Включити лабораторний стенд шляхом переведення тумблера стенду “СІТЬ” у верхнє положення.

2.2. Провести дослідження розгалуженого магнітопроводу .

2.2.1. Підключити обмотку розгалуженого магнітопроводу до джерела струму, для чого перевести перемикач “S2” в нижнє положення.

2.2.2. Встановити за допомогою потенціометра $R_{\text{рег.}}$ максимальний струм у ланцюзі обмотки. Значення струму I знайти, вимірюючи напругу U на шунті $R_{\text{ш.}}$ ($R_{\text{ш.}}=0,1 \text{ Ом}$).

2.2.3. Виміряти магнітну індукцію в стрижнях магнітопроводу.

2.2.4. Змінюючи силу струму (для 3 – 4 значень) повторити виміри магнітної індукції в стрижнях.

2.2.5. По відомим значенням магнітної індукції B , розрахувати магнітні потоки Φ в стрижнях. Перевірити, чи виконується 1-й закон Кірхгофа для магнітних

ланцюгів. Розрахувати відносну похибку вимірів $\delta\Phi_1 = |\Phi_1 - \Phi'_1|/\Phi_1$, де $\Phi'_1 = \Phi_2 + \Phi_3$.

Для кожного значення струму, використовуючи 2-й закон Кірхгофа для магнітних ланцюгів, розрахувати магнітну проникність μ матеріалу сердечника

$$\mu = B \cdot l_{cp} / I \cdot W \cdot \mu_0.$$

2.2.6. По середньому значенню визначити, із якого матеріалу виготовлений сердечник.

2.2.7. Результати вимірів та обчислень занести до таблиці 1.

Таблиця 1

I [A]	B1 [Тл]	Φ₁ [Вб]	B3 [Тл]	Φ₃ [Вб]	B2 [Тл]	Φ₂ [Вб]	Φ'₁=Φ₂+ Φ₃ [Вб]	δΦ₁ %	μ

2.2.8. Побудувати графіки залежностей **B(I)** для різних стрижнів магнітопроводу.

2.3. Провести дослідження магнітного поля в соленоїді.

2.3.1. Підключити джерело струму до соленоїда, для чого перевести перемикач “S2” у верхнє положення.

2.3.2. Встановити за допомогою потенціометра **R_{рег.}** максимальний струм в обмотці соленоїда.

2.3.3. Ввести зонд в соленоїд на глибину 50мм . Виміряти магнітну індукцію .

2.3.4. Повторити виміри магнітної індукції для 3-4 значень струму обмотки соленоїда.

2.3.5. Виймаючи зонд із соленоїда з кроком 5мм (лінійка нанесена на зонді), повторити виміри пп. 2.3.2., 2.3.4 та 2.3.5.

2.3.6. Дані занести до таблиці 2. Побудувати графіки залежностей **B(L)** .

Таблиця 2

I [A]	B, [Тл]				
	L=50мм	L=45мм	L=40мм	L=35мм	L=30мм

Опис експериментальної установки

Електричну схему експериментальної установки наведено на рис.1, де:

* номінали резисторів схеми: $R_1=16 \text{ Ом}$; $R_2=12 \text{ Ом}$; $R_{\text{рег.}}=0\ldots68 \text{ Ом}$, $R_{\text{ш}} = 0,1 \text{ Ом}$;

* параметри розгалуженого магнітопроводу (дроселя)

- площі стрижнів магнітопроводу $S_1=S_2=0,4\cdot10^{-3}\text{м}^2$ (бокові), $S_3=1,1\cdot10^{-3}\text{м}^2$ (центральный);

- кількість витків обмотки $W=1500$;

- довжина середньої лінії, що проходить через стрижень з обмоткою та середній стрижень

$l_{\text{ср1}} = \text{м}$;

- довжина середньої лінії, що проходить через стрижень з обмоткою та другий крайній стрижень $l_{\text{ср2}} = \text{м}$.

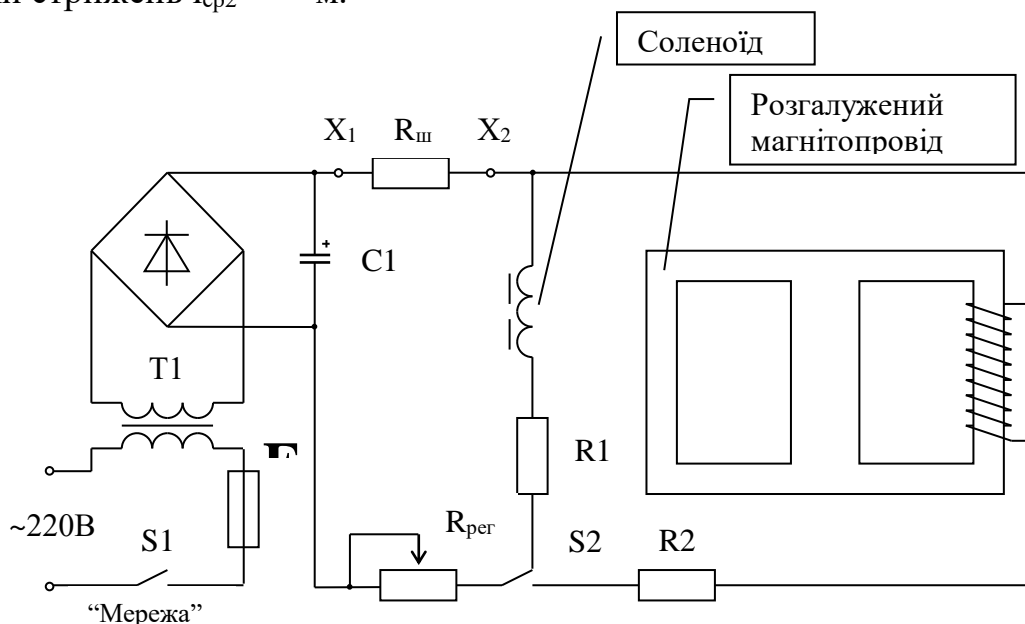


Рис 1.

4. Зміст звіту

1. Титульний лист із назвою роботи.
2. Мета роботи.
3. Схема експериментальної установки.
4. Результати вимірів.
5. Розрахункові дані та графіки.

5. Контрольні запитання

1. Назвіть головні величини, що характеризують магнітне поле.
2. Наведіть формулювання закону повного струму.
3. Наведіть формулювання першого та другого законів Кірхгофа для магнітних ланцюгів.
4. Визначте можливість перевірки законів Кірхгофа за допомогою лабораторного стенду.
5. Наведіть класифікацію засобів вимірювання магнітної індукції.

6. Література

1. Измеритель магнитной индукции Ш1-8, техническое описание и инструкция по эксплуатации. - М., 1978.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. - М.: Высшая школа, 1996.
3. Сергеев В.Г., Шихин А.Я. Магнитоизмерительные приборы и установки. - М.: Энергоиздат, 1982.
4. Миловзоров В.П. Электромагнитные устройства автоматики. - М.: Высшая школа, 1983.

Теоретичні відомості

Основні параметри та характеристики магнітного поля

При описі магнітного поля звичайно використовують такі основні характеристики: магнітну індукцію, напруженість поля і потік вектора магнітної індукції.

Вектор магнітної індукції \vec{B} приймають за основну характеристику магнітного поля. Він являється мірою впливу поля на заряд, що рухається, або провідник із струмом. Величина вектора \vec{B} в деякій точці, розташованій в середовищі з магнітною проникністю μ , складається з поля зовнішнього джерела і поля створюваного середовищем що намагнічується. За одиницю магнітної індукції - тесла [Тл] прийняте таке однорідне поле, що діє із силою в 1 ньютон на кожний метра довжини прямолінійного дроту з струмом у 1 ампер, за умови, що дріт, перпендикулярний до напрямку поля.

Поряд із магнітною індукцією на практиці широко використовують допоміжну характеристику, називану вектором напруженості магнітного поля - \vec{H} . Вектор напруженості визначає магнітну індукцію тільки зовнішніх джерел поля. Для опису напруженості формованої самою речовиною використовують поняття намагніченості \vec{J} . Одиницями напруженості й намагніченості поля в системі СІ являється [А/м].

Магнітна індукція пов'язана з напруженістю та намагніченістю наступним співвідношенням

$$\vec{B} = \mu\mu_0(\vec{H} + \vec{J}),$$

де: μ_0 - магнітна постійна (магнітна проникність вакууму) являє собою відношення магнітної індукції до напруженості магнітного поля у вакуумі і є фізичною константою, чисельно рівною $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ - відносна магнітна проникність речовини.

Суттєвою відміною вектора індукції \vec{B} від вектора напруженості \vec{H} є те, що силові лінії поля вектора індукції неперервні, в той час як лінії поля

напруженості можуть уриватися. Вони починаються та закінчуються на умовно введених магнітних зарядах, розташованих в областях, де змінюється намагніченість середовища.

Під час вивчення поля досить часто використовують графічний спосіб зображення, що запропоновано Фарадеєм. Характеристику поля визначають за допомогою векторних, або силових ліній напруженості чи індукції. Напрямок ліній в кожній крапці поля співпадає з напрямком вживаного вектору. Густина ліній пропорційна модулю вектора поля. Таку картину силових ліній називають магнітним спектром.

Магнітна індукція є фізичною величиною, що визначає інтенсивність магнітного потоку. Магнітний потік, на відміну від потоків інших полів, є величиною безперервною та замкненою. Графічно магнітний потік, що є скалярною інтегральною величиною, зображається лініями, розташованими таким чином, щоб в будь якій крапці поля дотична до лінії співпадала за напрямом з вектором магнітної індукції. Одиницею магнітного потоку в системі СІ є вебер [Вб] - це потік що утворюється однорідним магнітним полем з індукцією в 1 Тл через площадку в 1м^2 , нормальну до напрямку поля. Магнітний потік та індукція пов'язані наступним чином

$$\Phi = \int_S \vec{B} dS .$$

Для розрахунку однорідних магнітних полів досить часто вживають наступні поняття та співвідношення.

- Зовнішнє магнітне поле лінійного провідника з струмом I пов'язане з напруженістю магнітного поля

$$H = I / 2\pi \cdot r ,$$

де r - відстань від провідника до точки, у якій визначається напруженість.

- Якщо струм проходить по обмотці з числом витків W то він створює намагнічуючу силу (н.с.) або магніторушійну силу (м.р.с.) (А):

$$F = I \cdot W .$$

- Якщо обмотка рівномірно намотана на феромагнітний сердечник з однаковим перетином S по всій його довжині l , то напруженість магнітного поля сердечника:

$$H = I \cdot W / l.$$

- Під дією н.с. у сердечниках магнітних елементів створюється магнітний потік Φ . Якщо магнітний потік Φ проходить по сердечнику з обмоткою, що має W витків, то потокозчеплення обмотки (Вб)

$$\psi = \Phi \cdot W.$$

- Магнітний потік та магнітна індукція для однорідного поля пов'язані наступним виразом:

$$B = \Phi / S,$$

де S -площа, через який проходить магнітний потік.

- * Магнітна індукція в речовині:

$$B = \mu \mu_0 \cdot H,$$

де $\mu_0 \mu = \mu_a$ - абсолютна магнітна проникність речовини.

• I Закон Кірхгофа:

Перший закон Кірхгофа заснований на застосуванні безперервності магнітного потоку: *алгебраїчна сума магнітних потоків у довільно обраному вузлі ланцюга дорівнює нулю:*

$$\sum_{i=1}^n \Phi_i = 0.$$

• II Закон Кірхгофа:

У випадку кусочно-неоднорідного замкнутого сердечника його можна розділити на однорідні ділянки

$$\sum_i H_i l_i = \sum_j I_j W_j.$$

Алгебраїчна сума магнітних сил дорівнює алгебраїчній сумі добутків напруженості поля на шматках магнітного ланцюга на довжини цих ділянок.

Вимірювачі магнітних полів

В даний час розроблені і серійно випускаються магнітовимірювальні прилади, призначені для проведення вимірів параметрів постійних та змінних магнітних полів.

Для систематизації таких приладів, виробітки критеріїв оцінки метрологічних і експлуатаційних характеристик використовуються різноманітні класифікаційні ознаки. Можлива класифікація магнітовимірювальних приладів за призначенням, що включає вимірювачі магнітної індукції, магнітного потоку, напруженості магнітного поля, градієнту індукції магнітного поля, магнітної сприйнятливості і проникності матеріалу. Іноді прилади класифікують по галузях застосування – для геомагнітних досліджень, магнітохімії, магнітної дефектоскопії і т.д. Існує класифікація за умовами експлуатації, за способом вимірів, за функціональним зв'язком вихідного сигналу з вимірюваною величиною. Найбільш діючою і поширеною на цей час вважають класифікацію за принципом використання у первинних перетворювачах того або іншого фізичного явища. Такий розподіл дозволяє провести більш чітку оцінку показників конкретного виду перетворення, показати можливості його використання в різноманітних магнітовимірювальних пристроях і системах. У відповідності з даною класифікацією розрізняють первинні перетворювачі, що приведені в таблиці 3. У ній показаний далеко не повний перелік існуючих і потенційно можливих перетворювачів. Внаслідок малого розповсюдження через низькі метрологічні, технічні й експлуатаційні характеристики не подані магнітотеплові, індуктивні, фотомагнітні, феромодуляційні, електроннокінетичні перетворювачі.

Таблиця 3

Магнітометричні первинні перетворювачі					
Індукційні	Магніто- механічні	Кінетичні	Гальвано- магнітні	Квантові	Магніто- оптичні
Стаціонарні вимірювальні катушки, що обертаються і вібруючі катушки, п'єзострикційні, електрострикційні, і, фероіндукційні	Магнітомет- ричні, електродина- мічні, магнітостри- кційні	Магнетронні, електронно- променеві	Хола, магніторези- с-тивні	ЕМР, ЗПР, ФМР, плазмені	Поляризаці- й-ні, подвійного переломле- ння

Порядок роботи з вимірювачем магнітної індукції Ш1-8

Підготовка до роботи

- * Ознайомитися з елементами управління розташованими на передній панелі приладу Ш1-8 і визначити їхнє призначення.
- * Підключити зонд до рознімання “ЗОНД”. Зняти з нього захисний чохол.
- * Встановити тумблер “СЕТЬ” у верхнє положення, при цьому повинна загорітися сигнальна лампочка.
- * Прогріти прилад протягом 15 хвилин.
- * Шкалу першої декади відлікового пристрою “ОТСЧЕТ ИНДУКЦИИ, Т” встановити в положення “0”.
- * Тумблер “ПОЛЯРНОСТЬ” встановити в положення “N”.
- * Тумблер “ИНДИКАТОР” встановити в положення “ТОЧНО”.
- * Зонд розташувати таким чином, щоб він був максимально віддалений від стенду.
- * Резисторами “УСТ. НОЛЯ” - “ГРУБО”, “ТОЧНО” сполучити

стрілку індикатора з позначкою “0”.

* Помістити зонд у магнітне поле, при цьому стрілка індикатора повинна відхилитися вліво. Якщо стрілка індикатора відхилиться вправо, зонд потрібно повернути на 180°.

При використанні приладу необхідно мати на увазі, що правильні виміри можуть бути зроблені тільки тоді, коли площа зонда складає з напрямком вектора магнітної індукції кут 90°. В іншому випадку відлік (b_x) по приладу і справжнє значення індукції (B_x) зв'язані таким співвідношенням

$$b_x = B_x \cos \alpha,$$

де α - кут між векторами магнітної індукції і нормаллю до поверхні перетворювача.

Похибка приладу, викликана неправильною установкою зонда в магнітному полі, для кутів α , що не перевищують 4°, лежить у межах 0,25%. При подальшому збільшенні кута α додаткова похибка приладу швидко зростає і може значно спотворити результат виміру.

Проведення вимірів

* Встановити тумблер “ИНДИКАТОР” у положення “ГРУБО”, шкалу першої декади відлікового пристрою “ОТСЧЕТ ИНДУКЦИИ, Т” перевести в положення “0,0”. Ручку “КОРРЕКЦИЯ, Т” поставити в крайнє ліве положення. Помістити зонд у магнітне поле. Головку зонда необхідно помістити в магнітне поле таким чином, щоб площа головки зонда з позначкою “0” була перпендикулярна напрямку вектора магнітного поля. За допомогою ручок “ОТСЧЕТ ИНДУКЦИИ, Т” домогтися суміщення стрілки індикатора з нулем шляхом поступового збільшення (зменшення) показань шкал відлікового пристрою.

* Ручкою “КОРРЕКЦИЯ, Т” установити візир шкали на риску, що відповідає показанню відлікового пристрою. За допомогою перемикачів “ОТСЧЕТ ИНДУКЦИИ, Т” сполучити стрілку індикатора з нулем. Тумблер

“ИНДИКАТОР” встановити в положення “ТОЧНО”. За допомогою перемикачів “ОТСЧЕТ ИНДУКЦИИ, Т” сполучити стрілку індикатора з нулем.

* Послідовно встановлюючи візир шкали “КОРРЕКЦИЯ, Т” на риску, що відповідає показанню відлікового пристрою, і поєднуючи стрілку індикатора з нулем за допомогою перемикачів “ОТСЧЕТ ИНДУКЦИИ, Т”, домогтися збігу показань шкали відлікового пристрою і шкали “КОРРЕКЦИЯ, Т”. Як правило, достатньо двох, трьох наближень. Потім зняти показання по відліковому пристрою “ОТСЧЕТ ИНДУКЦИИ, Т”.

3. Лабораторна робота №2 Перевірка законів Ома та Кірхгофа у розгалуженому магнітному ланцюзі.

1. Мета роботи

Перевірити на практиці закон Ома та 1-й і 2-й закони Кірхгофа в розгалуженому магнітному ланцюзі.

2. Програма роботи

2.1 Ознайомитися з макетом лабораторної роботи (рис. 1). З'ясувати призначення елементів схеми.

2.2 Провести експеримент на перевірку 1-го закону Кірхгофа. Виміряти значення напруги на первинній $W2$ ($X2$, $X3$) та вторинних обмотках $W1$ ($X4$, $X5$), $W3$ ($X6$, $X7$) трансформатора.

2.3 Розрахунковим шляхом перевірити виконання 2-го закону Кірхгофа.

2.4 Розрахунковим шляхом перевірити виконання закону Ома для магнітного ланцюга.

2.5 Повторити вимірювання та розрахунки, що визначені в пп. 2.2-2.4, для 3-4 значень струму обмотки. Величину струму змінювати за допомогою резистора $R_{\text{рег}}$.

2.6 Зробити висновки по роботі.

3. Опис експериментальної установки

Експериментальна схема (рис. 1) містить магнітний ланцюг, який виготовлено на броньовому осерді з електротехнічної сталі. На середній стержень осердя намотана первинна обмотка $W2$, на яку подається синусоїдальна напруга. На бокові стержні осердя намотані вторинні (вимірювальні) обмотки $W1$, $W3$. В ланцюгах вторинних обмоток включені резистори навантаження $R1$, $R2$.

Параметри елементів стенду:

- * номінали резисторів $R_{ш}=200\text{ Ом}$, $R_1=3\text{ кОм}$, $R_2=2,4\text{ ком}$.

Параметри досліджуваного магнітного елемента:

- * кількість витків обмоток $W_1=130$, $W_2=225$, $W_3=138$;
- * площі перетину стрижнів та довжина середніх ліній ділянок магнітного ланцюга:
 - середній стрижень $S_1=6,4\text{ см}^2$; $l_{cp2}=14\cdot 10^{-3}\text{ м}$;
 - бокові стрижні $S_2=S_3=3,2\text{ см}^2$; $l_{cp1}=l_{cp3}=42\cdot 10^{-3}\text{ м}$;
- * магнітна проникність магнітопроводу $\mu=2000$.

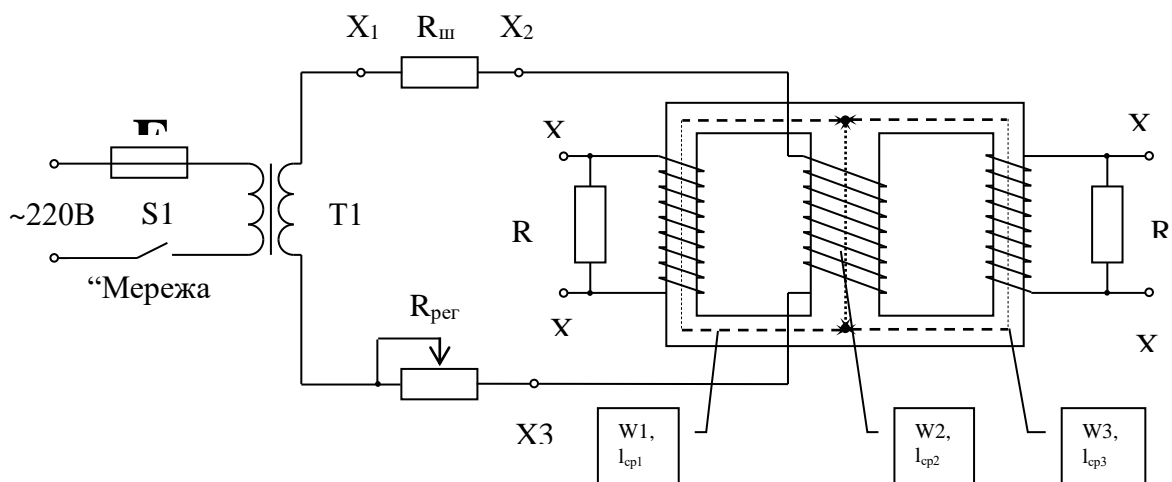


Рис.1

4. Зміст звіту

1. Титульний лист із назвою роботи.
2. Мета роботи.
3. Схема експериментальної установки.
4. Результати вимірів.
5. Розрахункові дані.
6. Висновки по роботі.

5. Контрольні запитання

1. Визначте основні величини, що характеризують магнітне поле.
2. Встановіть взаємозв'язок між електричними і магнітними величинами.
3. Наведіть формулювання законів Ома та Кірхгофа для магнітних ланцюгів.
4. Наведіть приклад розрахунку розгалуженого магнітного ланцюга, з використанням 1-го та 2-го законів Кірхгофа.
5. Визначте методику перевірки законів Кірхгофа у розгалуженому магнітному ланцюзі.

6. Література

1. Миловзоров В.П. Электромагнитные устройства автоматики. - М.: Высшая школа, 1974.
2. Преображенский А.А., Шамрай Б.В. Электромагнитные устройства информационно-измерительной техники. - М.: Высшая школа, 1982.
3. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Изд. 6-е перераб. и доп. Учебник для студентов энергетических и электротехнических вузов. - М.: Высшая школа, 1973.

7. Теоретичні відомості

Основними векторними величинами, що характеризують магнітне поле, є магнітна індукція \vec{B} та намагніченість \vec{J} .

Крім індукції та намагніченості магнітне поле характеризується напруженістю магнітного поля \vec{H} . Намагніченість і напруженість магнітного поля вимірюють в амперах на метр (А/м).

Вектори \vec{B} , \vec{H} , для ізотропного середовища зв'язані наступними співвідношеннями:

$$\vec{B} = \mu\mu_0(\vec{H} + \vec{J}),$$

де: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна постійна, $\mu_A = \mu_0 \mu = B/H$ - абсолютна магнітна проникність.

Використання магнітних ланцюгів дозволяє зосередити магнітне поле в заданій області простору та надати йому певну конфігурацію.

Магнітний потік створюється або струмами, що протікають по провідникам, або постійними магнітами. В однорідному середовищі напруженість магнітного поля не залежить від магнітних властивостей середовища і визначається величинами намагнічуючих струмів та формою обтічних ними провідників.

Кількісний зв'язок між лінійним інтегралом від вектору напруженості магнітного поля \vec{H} вздовж будь-якого довільного контуру і алгебраїчною сумою струмів, охоплених цим контуром, визначається **законом повного струму**

$$\int_l \vec{H} dl = \sum I.$$

Додатній напрям інтегрування dl зв'язаний з додатнім напрямком струму I правилом правоходового гвинта. Якщо контур інтегрування охоплює W витків котушки, із струмом I , то закон повного струму має вигляд:

$$\int_l \vec{H} dl = IW = F,$$

де F - магніторушійна сила (м.р.с.), вимірюється в амперах. Магніторушійна сила викликає магнітний потік в магнітному ланцюзі подібно тому, як електрорушійна сила викликає електричний струм в електричному ланцюзі. Магніторушійна сила є величиною направленою, її позитивне направлення на схемі позначають стрілкою. Позитивне направлення м.р.с. співпадає з рухом вістря правого гвинта, якщо його обертати за напрямком струму в обмотці.

Для кусочно-лінійних магнітних ланцюгів інтеграл в законі повного струму замінюють на суму добутків $H_k l_k$, де індекс «к» вказує ділянку, вздовж

якої напруженість H та μ приймаються незмінними. В цьому разі формула для закону повного струму набуває наступного вигляду

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = F ,$$

де n – кількість ділянок з незмінними значеннями H та μ . Добуток $H_k l_k$, за відсутності обмотки з струмами на k -ій ділянці, називають падінням магнітної напруги між точками a і b і позначають U_{mab} , де a і b - початок і кінець ділянки.

Магнітні ланцюги можуть бути розгалуженими і нерозгалуженими. Враховуючи, що лінії магнітної індукції неперервні і замкнуті, отримуємо, що потік вектору магнітної індукції через замкнену поверхню дорівнює нулю.

$$\Phi = \int_s \vec{B} ds = 0 .$$

З цього рівняння слідує, що при відсутності потоку розсіювання, потік в нерозгалуженому магнітному ланцюзі на всіх її ділянках один і той же, а в розгалуженому ланцюзі потік на ділянці, яка підходить до місця розгалуження, дорівнює сумі магнітних потоків на ділянках, які відходять від місця розгалуження. Для вузлів магнітних ланцюгів справедливе рівняння

$$\sum_{k=1}^n \Phi = 0 .$$

Це рівняння виражає **перший закон Кірхгофа** для магнітних ланцюгів: алгебраїчна сума магнітних потоків в вузлі магнітного ланцюга дорівнює нулю. Перший закон Кірхгофа для магнітних ланцюгів слідує з принципу неперервності магнітного потоку.

На основі закону повного струму можна отримати рівняння для **другого закону Кірхгофа**:

$$\sum_{k=1}^n H_k l_k = \sum_{j=1}^m I_j W_j ,$$

де m - кількість обмоток з струмом. Другий закон Кірхгофа може бути представлений наступним чином: алгебраїчна сума магнітних падінь напруги

вздовж будь-якого замкнутого контуру дорівнює алгебраїчній сумі м.р.с. вздовж того ж контуру.

Для розрахунку магнітних ланцюгів доволі часто використовують **закон Ома**:

$$\Phi = \frac{F}{\sum_k \frac{l_k}{\mu_k S_k}} = \frac{F}{\sum_k R_{Mk}},$$

де R_{Mk} - магнітний опір ділянки ланцюга, на k -ому інтервалі сталості магнітного ланцюга. При незмінному поперечному перерізі і магнітній проникності μ_a

$$R_M = \frac{l_{cp}}{\mu_a S},$$

де l_{cp} - довжина середньої лінії магнітопроводу.

Неважко встановити взаємозв'язок між законами Кірхгофа для електричних і магнітних ланцюгів, а також визначити дуальні співвідношення між електричними та магнітними величинами:

- 1) $I \sim \Phi$,
- 2) $e \sim F$, $U \sim U_M$, $R \sim R_M$.

Перед тим, як записати рівняння по законам Кірхгофа, потрібно довільно вибрати напрямки потоків в гілках і напрямки обходу контурів. Якщо напрямок магнітного потоку на деякій ділянці співпадає з напрямком обходу, то падіння магнітної напруги цієї ділянки входить в суму магнітних падінь U_M зі знаком плюс, якщо назустріч йому, то зі знаком мінус. Аналогічно, якщо м.р.с. співпадає з напрямком обходу, вона входить в $\sum W I$ зі знаком плюс, в протилежному випадку - зі знаком мінус.

Для прикладу складемо систему рівнянь по законам Кірхгофа для розгалуженого магнітного ланцюга, зображеного на рис. 2.

У цьому магнітному ланцюзі між двома вузлами, що позначено крапками a і b , можна виділити три гілки. Довільно оберемо напрям потоків у гілках.

Нехай всі потоки (Φ_1 , Φ_2 , Φ_3) направлені до вузла а. Кількість рівнянь, які слід скласти за законами Кірхгофа, повинна дорівнювати кількості гілок ланцюга. У нашому випадку потрібно скласти три рівняння. Кількість незалежних рівнянь, що складаються за першим законом Кірхгофа, менше на одиницю за кількість вузлів. Оскільки магнітний ланцюг має два вузла, то за першим законом Кірхгофа складемо одне рівняння

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = 0.$$

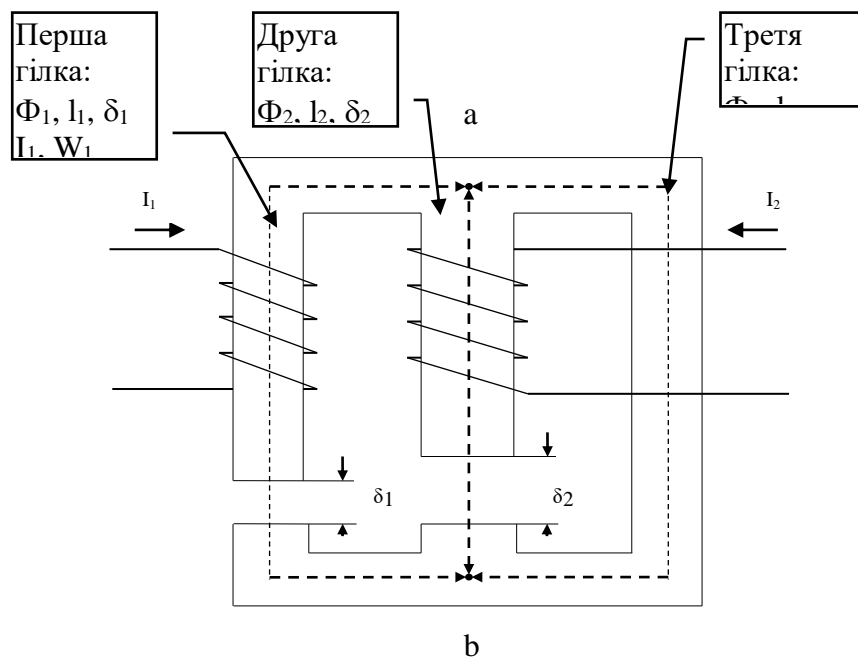


Рис. 2.

За другим законом Кірхгофа можливо скласти таку кількість незалежних рівнянь, що дорівнює кількості гілок, за винятком кількості рівнянь, складених за першим законом Кірхгофа. У нашому випадку, за другим законом Кірхгофа складемо два рівняння.

Перше з цих рівнянь записуємо для контуру, що включає першу і другу гілки, друге - для контуру, утвореного першою і третьою гілками. Перед складанням рівнянь необхідно обрати позитивний напрямок обходу контурів. Оберемо напрямок обходу контурів за годинниковою стрілкою. Вважаємо, що

напруженість магнітного поля в щілині дорівнює напруженості в прилягаючій до неї частині магнітопроводу.

Рівняння для контуру, утвореного першою і другою гілками, має вигляд

$$H_1 l_1 + H_1 \delta_1 - H_2 l_2 - H_2 \delta_2 = I_1 W_1 - I_2 W_2.$$

В ліву частину рівняння увійшли складові $H_1 l_1$ і $H_1 \delta_1$ зі знаком плюс, бо на першій ділянці потік Φ_1 направлений згідно з напрямом обходу контуру, складові $H_2 l_2$, $H_2 \delta_2$ - зі знаком мінус, бо потік Φ_2 направлений назустріч напрямку обходу контуру. В правую частину рівняння м.р.с. $I_1 W_1$ увійшла зі знаком плюс, бо вона направлена згідно з напрямом обходу контуру, а м.р.с. $I_2 W_2$ - зі знаком мінус, бо вона направлена назустріч напрямку обходу контуру.

Для другого контуру, утвореного першою і третьою гілками

$$H_1 l_1 + H_1 \delta_1 - H_3 l_3 = I_1 W_1.$$

Складена система з трьох рівнянь має три невідомих Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 .

Практично можна перевірити виконання законів Кірхгофа для магнітного ланцюга наступним чином. На вхід наведеної в описі лабораторної роботи експериментальної установки необхідно подати змінну напругу.

Знаючи кількість витків обмотки W_2 і поперечну площу перерізу магнітопроводу S_2 , можна знайти значення магнітної індукції B_2 в осерді

$$B = \frac{U}{4k_\Phi f W S_k},$$

де: k_Φ - коефіцієнт форми напруги (для синусоїдальної форми напруги $k_\Phi = 1$, 11), f - робоча частота [Гц], B - індукція [Тл], S_k - площа магнітопроводу [м²], U - амплітуда напруги, що подається [В], W - кількість витків.

Вимірюючи значення напруги у вторинних обмотках, можна знайти значення магнітної індукції в першій та третій гілках (B_1 , B_3).

З використанням формули

$$\Phi = B S,$$

знаходимо значення магнітного потоку в усіх гілках ланцюга (Φ_1 , Φ_2 , Φ_3) і перевіряємо виконання першого закону Кірхгофа.

По визначеним значенням магнітної індукції знаходимо значення напруженості магнітного поля (H_1, H_2, H_3)

$$H = \frac{B}{\mu\mu_0}.$$

По відомим номіналам резисторів R_1 і R_2 , що включені в ланцюги вимірювальних обмоток, за законом Ома можна визначити значення струмів вторинних обмоток. Знаючи довжину ділянок магнітопроводу l_1, l_2, l_3 , можливо перевірити виконання другого закону Кірхгофа.

4. Лабораторна робота №3 Дослідження характеристик магнітного сердечника.

1. Мета роботи

- * Ознайомитися з методом дослідження характеристик магнітних сердечників.
- * Дослідити статичні та динамічні характеристики магнітних сердечників.
- * Визначити параметри досліджених сердечників.

2. Програма роботи

2.1 Ознайомитися з макетом лабораторної роботи. Усвідомити призначення елементів схеми, наведеної на рис.1.

2.2 Визначити коефіцієнти відхилення по вертикальній і горизонтальній осям осцилографа. Для цього, за допомогою відкаліброваного каналу вертикального відхилення Y осцилографа, необхідно встановити амплітуду вихідного сигналу генератора синусоїдальних коливань в 1В. Для визначення коефіцієнту відхилення по горизонтальній осі цей сигнал необхідно подати на вхід каналу горизонтального відхилення X.

По коефіцієнтам відхилення по вертикальній та горизонтальній осям визначити масштаби магнітної індукції B і напруженості поля H

$$U_{C2} = U_Y = W_2 \cdot S \cdot B / R_6 C_2 ,$$

$$U_x = K_{oy} U_{R2} = K_{oy} (R_2 \cdot I_{cp} \cdot H / W_1) ,$$

де : W_1, W_2 - кількість витків первинної та вторинної обмоток сердечників;
 $S = k_{ст} S_{ст}$ - площа перетину сердечника; $k_{ст}$ - коефіцієнт заповнення сердечника сталлю, $S_{ст}$ - площа перетину магнітопроводу, l_{cp} - довжина середньої лінії магнітопроводу; K_{oy} - коефіцієнт передачі підсилювача сигналу з датчика струму. Величини параметрів елементів схеми наведено в описі експериментальної установки.

2.3 Встановити частоту сигналів генератора $f = 100-200$ Гц. Змінюючи амплітуду сигналу генератора, зняти симетричні петлі гістерезису.

Максимальні значення індукції і напруженості поля занести до таблиці 1.

Таблиця 1

B [T]									
H [A/м]									

2.4 По максимальній петлі гістерезису визначити величини залишкової магнітної індукції B_r , коерцитивної сили H_C , напруженості поля рушання H_T .

2.5 Зробити розрахунок коефіцієнта прямокутності $\alpha = B_R / B_M$ (B_M визначається при $H_T = 3-5H_C$), і коефіцієнта квадратності $K_T = H_T / H_C$.

2.6 По площі петлі гістерезису визначити величину втрат на гістерезис

$$P_r = f \cdot V \oint H dB,$$

де f - частота перемагнічування, V – об'єм сердечника.

По даним, що занесені до таблиці 1, побудувати основну криву намагнічування $B=f(H)$. Зробити розрахунок магнітної проникності в крапці

$$\mu_A = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_A}{H_A}$$

і диференціальної магнітної проникності

$$\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{dB}{dH}$$

для 2 – 3 різних значень напруженості магнітного поля.

2.8 Зняти і побудувати характеристики, зазначені в п.п.2-7, для іншого зразка.

2.9 Для обох зразків отримати динамічні петлі гістерезису, змінюючи частоту генератора в діапазоні $f = 400 - 4000$ Гц.

2.10 Зробити розрахунок пружної $\mu_1 = B_{1m} / H_{1m}$ і в'язкої $\mu_2 = B_{2m} / H_{2m}$ - магнітних проникностей, де $B_{1m} = B_m \cos \varphi$, $B_{2m} = B_m \sin \varphi$.

Розрахувати тангенс кута втрат $\tan \delta = \mu_1 / \mu_2$.

3. Опис експериментальної установки

Схему експериментальної установки наведено на рис.1. Схема дозволяє проводити дослідження статичних характеристик двох типів магнітного матеріалу, що використано для виготовлення вимірювальних трансформаторів T1 та T2. Комутація трансформаторів до експериментальної схеми забезпечується за допомогою перемикача S2.

Для формування сигналу пропорційного напруженості магнітного поля використовується сигнал з датчика струму R2. З метою розширення петлі гістерезису на екрані осцилографу застосовано підсилювач сигналу датчика струму. За допомогою перемикача S1 можлива зміна коефіцієнту підсилення цього підсилювача.

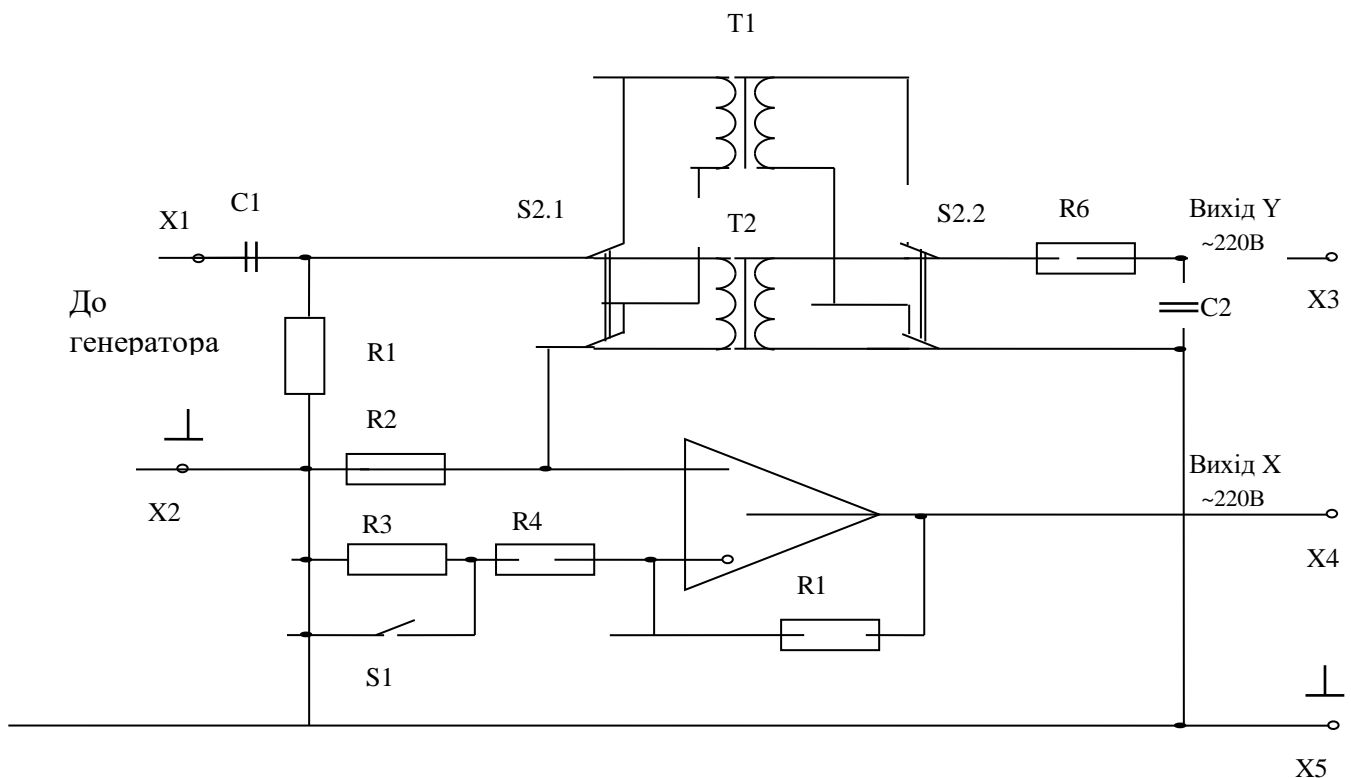


Рис.1

Для формування вихідного сигналу пропорційного магнітній індукції використовується інтегруючий ланцюг R6, C2. На вхід цього ланцюга

подається напруга з вимірювальної обмотки трансформатора, що пропорційна похідній від магнітної індукції.

Для проведення досліджень стенд необхідно підключити до зовнішніх вимірювальних приладів. Вхідні клеми X1, X2 експериментальної установки необхідно з'єднати з виходом генератора синусоїдальних сигналів. Вихідні клеми X3, X4, X5 необхідно підключити, відповідно, до входу Y, входу X та корпусному входу осцилографу. Осцилограф необхідно перевести в режим розгортання від входу X.

В експериментальній установці використано елементи з наступними параметрами:

- Вимірювальні трансформатори T1, T2 виконано на кільцевих магнітопроводах розрізом 7x7 мм, зовнішнім діаметром $\Phi_{\text{нс}} = 36$ мм, внутрішнім діаметром $\Phi_{\text{внс}} = 22$ мм, довжиною середньої лінії магнітопроводу $L = 28$ мм. Кількість витків первинної та вторинної обмоток $W_1 = W_2 = 25$.
- Номінальні значення параметрів $R_2 = 22$ Ом, $R_6 = 22$ кОм, $C_2 = 0,68$ мкФ.
- Коефіцієнт підсилення підсилювача сигналу датчика струму $K_{\text{ОУ}} = 20$ або 5, в залежності від стану перемикача S1.
- Стенд має такі обмеження по параметрам сигналу генератора синусоїдальної напруги:
 - частота сигналу $f > 50$ Гц ;
 - діюче значення напруги $U < 15$ В.

4. Зміст звіту

4.1 Мета роботи.

4.2 Схема вимірювальної установки.

4.3 Результати експериментів.

4.4 Розрахункові дані.

4.5 Висновки по роботі.

5. Контрольні запитання

- 5.1 Навести класифікацію магнітних матеріалів.
- 5.2 Пояснити процеси перемагнічування феромагнетиків.
- 5.3 Визначити статичні параметри магнітних матеріалів.
- 5.4 Визначити статичні характеристики магнітних матеріалів.
- 5.5 Визначити динамічні характеристики магнітних матеріалів при їх перемагнічуванні в синусоїдальних полях.
- 5.6 Пояснити призначення всіх елементів схеми та принцип роботи вимірювальної установки.

6. Література

- 6.1 М.А.Боярченков, А.Г.Черкашина Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. - М.: Высшая школа, 1976.
- 6.2 Миловзоров В.П. Электромагнитные устройства автоматики". - М.: Высшая школа, 1974.

7. Теоретичні відомості

Феромагнітні властивості проявляються в речовинах, атоми яких мають недобудовану електронну оболонку. Наявність некомпенсованих спінових моментів електронів є необхідною, але не достатньою умовою феромагнетизму.

Сильна електрична взаємодія електронів сусідніх атомів є другою умовою виникнення феромагнетизму. При цьому частина електронів одного атома розташовується в районі ядра іншого атома. Між атомами як би відбувається безупинний обмін електронами. Зазначену взаємодію називають "обміном", а енергію цієї взаємодії називають обмінною енергією. При позитивній обмінній енергії обмінна взаємодія атомів приводить до рівнобіжної орієнтації некомпенсованих спінів, що обумовлює спонтанну намагніченість

речовини, що характеризує його феромагнітні властивості. При більшій негативній величині обмінної енергії спіни електронів встановлюються антипаралельно. Такий стан речовини називають антиферомагнетизмом.

Більшість феромагнетиків складаються з зерен - кристалів неправильної форми. Магнітні властивості кристалів у різних напрямках неоднакові. Існують напрямки легкого, середнього та важкого намагнічування. Неоднорідність магнітних властивостей по різних напрямках називають магнітною анізотропією.

Для поліпшення магнітних властивостей магнітні матеріали піддають спеціальній механічній і термічній обробці, у результаті якої осі всіх кристалів одержують переважну орієнтацію в якому-небудь напрямку всередину зразка. Таку переважну орієнтацію називають текстурою.

У відсутності зовнішнього магнітного поля феромагнетик складається з областей з спонтанною намагніченістю доменів, розташованих таким чином, що результуючий магнітний момент тіла дорівнює нулю.

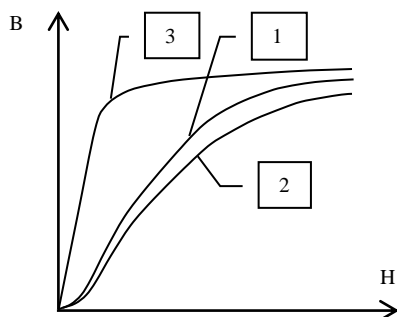


Рис. 2

Магнітні властивості речовини в статичних умовах характеризує крива намагнічування $B=f(H)$. У залежності від умови намагнічування феромагнетику розрізняють початкову 1, основну 2, і безгістерезисну 3 (рис.2) криві намагнічування.

Початкова крива намагнічування спостерігається у цілком розмагніченого

феромагнетику при монотонному і повільному збільшенні магнітного поля.

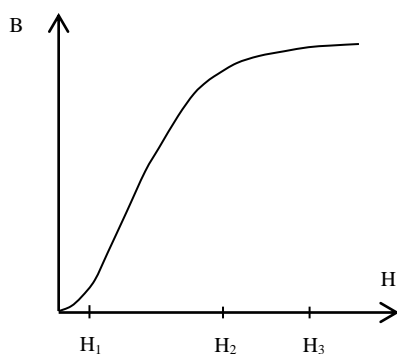


Рис. 3

На ділянці $0 < H < H_1$ кривої початкового намагнічування (рис.3) відбувається оборотний процес зсуву границь доменів.

На ділянці $H_1 < H < H_2$ відбувається необоротний зсув границь доменів. За рахунок

процесу зсуву ростуть ті домени, у яких напрям магнітних моментів має невеликий кут з напрямком зовнішнього поля (рис.4), а розміри інших доменів зменшуються.

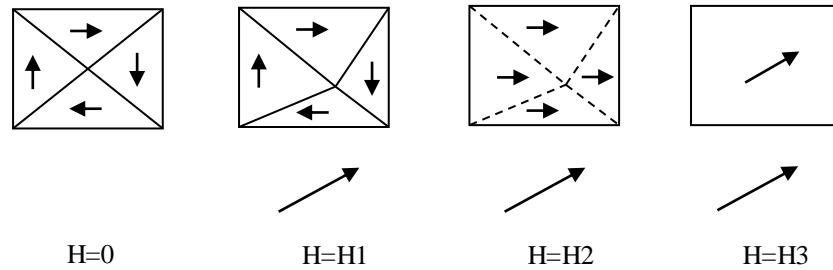


Рис. 4

По закінченню процесу зсуву границь магнітний момент спрямований по тій осі легкого намагнічування, що складає найменший кут із зовнішнім полем.

З підвищенням напруженості поля (ділянка $H_2 < H < H_3$) магнітні моменти всіх доменів повертаються в напрямку поля. Ділянка у відповідає оборотному процесу обертання. При збігу цих напрямків має місце так називане технічне насичення феромагнетика. Напруженість поля H_s , при якій відбувається насичення називають напруженістю поля насичення.

При подальшому збільшенні магнітного поля намагніченість збільшується тільки за рахунок збільшення магнітного моменту під дією напруженості, що полягає в додатковій орієнтації здовж поля спінових моментів окремих електронів проти дії їхнього теплового руху.

Якщо зменшити напруженість поля H , то намагніченість також зменшиться за рахунок обертання магнітних моментів доменів у напрямку найближчої осі легкого намагнічування (оборотній процес). При $H=0$ у феромагнетика зберігається залишкова індукція B_r . Подальше зменшення магнітного поля приводить до розмагнічування феромагнетика, причому зменшення індукції відбувається головним чином за рахунок необоротного процесу зсуву границь доменів. При напруженості поля $H=H_s$, яку називають коерцитивною силою, $B=0$ явище відставання намагніченості від напруженості

магнітного поля обумовлено наявністю необоротних процесів намагнічування. Таке явище називають гістерезисом, замкнуту криву за повний цикл зміни напруженості - петлею гістерезису. Найбільшу петлю гістерезису називають граничною. Крива, що проходить через вершини симетричних петель гістерезису, називається основною кривою намагнічування.

Безгістерезисну криву намагнічування одержують у результаті впливу на феромагнетик постійного і змінного полів. Пропускаючи по обмотці сердечника постійний і змінний низькочастотний струми в сердечнику створюють постійну напруженість і змінну напруженість, амплітуда якої перевищує H_s . Потім амплітуду змінного струму зменшують до нуля, фіксуючи значення індукції. У такий спосіб для різних значень постійних напруженостей знімають різні значення індукції. Сукупність усіх крапок дає безгістерезисну криву намагнічування.

Ряд магнітних матеріалів має структуру, при якій напрямки легкого намагнічування практично співпадають. Якщо зовнішнє магнітне поле діє в напрямку легкого намагнічування, то намагніченість матеріалу буде змінюватися лише за рахунок зсуву границь доменів. Магнітний матеріал з такою текстурою має в напрямках легкого намагнічування так звану прямокутну петлю гістерезису. Якість петлі оцінюють коефіцієнтом прямокутності

$$\alpha = B_r / B_m$$

і коефіцієнтом квадратності

$$K_T = H_T / H_s,$$

де: B_m встановлюється при $H_m = 3-5 \cdot H_s$; H_T - напруженість поля рушання, починаючи з якої у магнітному матеріалі відбуваються в основному необоротні процеси перемагнічування.

Феромагнетики прийнято характеризувати кількома параметрами, вимірними за певних умов, що дозволяють одержувати однозначне відтворення результату. До цих параметрів відносяться: індукція насичення

B_s , індукція B_m при полі H_m , залишкова індукція B_r , коерцитивна сила, початкова проникність $\mu_{нач}$, максимальна проникність μ_{max} . Абсолютна магнітна проникність

$$\mu_a = B/H = \mu_0 \mu$$

де: $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - магнітна проникність вакууму, μ - відносна магнітна проникність.

Для статичних характеристик магнітного матеріалу часто використовують магнітну проникність у крапці (рис.7)

$$\mu_a = (1/\mu) * \tan \alpha = B_a / \mu_0 * H_a$$

де:

$$\mu_{нач} = (1/\mu_0) * \tan \alpha_1$$

$$\mu_{max} = (1/\mu_0) * \tan \alpha_2$$

і диференціальну магнітну проникність

$$\mu_d = (1/\mu_0) * (dB/dH) = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} (1/\mu_0) * (\Delta B / \Delta H), \quad \Delta H \Rightarrow 0$$

8. Втрати в магнітних матеріалах

Перемагнічування магнітних матеріалів потребує затрат енергії. В теорії магнетизму виділяють два типи втрат на перемагнічування :

- Статичні втрати;
- Динамічні втрати.

8.1 Статичні втрати

Статичні втрати визначаються в режимах достатньо повільного перемагнічування на частотах, для яких не проявляються суттєво ефекти властиві для динамічних режимів. Потужність втрат на перемагнічування, або на гістерезис, визначається наступним чином

$$P_z = V f \oint H dB,$$

де:

- V – об'єм осердя;

- f – частота перемагнічування;
- $\oint HdB$ - площа петлі гістерезису, яка відповідає робочому режиму

перемагнічування.

Достатньо складно обраховується площа петлі гістерезису робочого режиму. У довідковій літературі доступні матеріали, які визначають форму петлі для певних режимів перемагнічування, з заданими частотою та максимальним значенням індукції. Практично відсутні технічні матеріали, які дозволяють перерахувати площу для визначеного розробником режиму роботи. Тому на практиці вживають наступну розрахункову формулу

$$P_z \cong \beta B_{\max} V f,$$

де: B_{\max} - максимальне значення індукції; β - коефіцієнт, що визначається дослідним шляхом та приводиться в довідковій літературі. Така формула дозволяє приблизно визначити потужність втрат в силу нелінійної залежності між максимальним значенням індукції та площею петлі перемагнічування.

8.2 Динамічні втрати

У разі достатньо швидкого перемагнічування магнітних матеріалів проявляється вплив двох ефектів: вихрових струмів та магнітної в'язкості.

Під впливом змінного магнітного поля на поверхні магнітного матеріалу формуються вихрові струми, або струми Фуко. Магнітне поле цих струмів екранує внутрішній об'єм осердя внаслідок чого магнітний потік витісняється на поверхню осердя. Це приводить до розширення петлі перемагнічування, зменшенню еквівалентної магнітної проникності та неефективного використання об'єму осердя. Такі петлі гістерезису називають динамічними характеристиками перемагнічування.

Товщина магнітного матеріалу для якої ефект вихрових струмів проявляється несуттєво визначається наступним чином

$$d \leq \sqrt{\frac{\rho}{\mu_{\max} f}},$$

де: ρ – питомий опір; μ_{max} – максимальна абсолютна проникність магнітного матеріалу.

Вихрові струми викликають додаткові втрати на перемагнічування

$$P_e = \xi \frac{f^2 B_{max}^2 d^2 V}{\rho},$$

де: ξ - коефіцієнт, що залежить від магнітного матеріалу.

Для зменшення втрат від вихрових струмів осердя, в яких використовуються металеві магнітні матеріали з малою величиною питомого опору, виконують з набору пластин або стрічки. Їх товщина обирається у відповідності з приведеною вище формулою. Шари такого осердя ізолюють між собою шарами окислу, або лаку.

Дія вихрових струмів проявляються також в обмотувальних проводах. Магнітне поле цих струмів екранує внутрішні шари провідника, витісняє струм з глибини проводу на поверхню. Внаслідок цього площа перетину проводу використовується нераціонально. Зростає щільність струму та температура нагріву проводу.

У довідниковій літературі приводять дані, які характеризують збільшення опору проводу у залежності від робочої частоти та його діаметру. У табл.2 приведено дані, де для різних значень робочої частоти показано величину глибини проникнення (d) та значення коефіцієнту збільшення питомого опору проводу (K_R).

Таблиця 2

$f, [\text{кГц}]$		10	20	50	100	150	200	500	1000
$d, [\text{мм}]$		0,663	0,47	0,205	0,21	0,17	0,15	0,094	0,066
K_R	0,2	-	-	-	-	-	-	1,004	1,13
	0,5	-	-	-	1,03	1,11	1,2	1,64	2,13
	0,8	-	-	1,07	1,3	1,49	1,66	2,41	3,3
	1,0	-	1,003	1,2	1,51	1,77	1,98	2,94	4,06
	1,5	1,013	1,16	1,58	2,08	2,49	2,82	4,29	5,94

Динамічні втрати на перемагнічування мають також другу складову, яка обумовлена магнітною в'язкістю.

В теорії феромагнетизму магнітною в'язкістю, або магнітною післядією, називають відставання зміни у часі магнітних величин (намагніченості, проникності) від зміни напруженості зовнішнього магнітного поля. Внаслідок цього намагніченість магнітного матеріалу встановлюється з затримкою від 10^{-9} секунди до декількох годин. Розрізняють прояви магнітної в'язкості у формі акомодатії та дезакомодатії. Акомодатія - це форма прояву магнітної в'язкості, яка характеризується пристосуванням зміни намагніченості магнітного матеріалу до зміни напруженості зовнішнього магнітного поля. Дезакомодатія – це форма прояву магнітної в'язкості, яка характеризується продовженням зміни намагніченості (магнітної проникності) після закінчення зміни напруженості зовнішнього магнітного поля.

В теорії феромагнетизму вважають, що ефект магнітної в'язкості обумовлений вихровими струмами які виникають за рахунок руху стінок доменів при перемагнічуванні магнітних матеріалів в зоні незворотних перетворень. Магнітні поля цих струмів, як і струмів Фуко екранують внутрішній об'єм магнітного матеріалу. В результаті цього дія магнітної в'язкості проявляється у розширенні петлі перемагнічування погіршенні магнітних властивостей матеріалу та збільшені втрат на перемагнічування.

У технічній літературі відсутні методики розрахунку втрат на перемагнічування, які обумовлені магнітною в'язкістю. У деяких виданнях рекомендують визначати цю складову на підставі загальних втрат на перемагнічування

$$P_{\text{вяз}} = P_{\Sigma} - (P_B + P_{\Gamma}),$$

де: P_{Σ} - загальні втрати на перемагнічування; P_B – втрати на вихрові струми; P_{Γ} - статичні втрати на гістерезис.

8.3 Визначення загальних втрат на перемагнічування

При проведенні розрахунків загальних втрат на перемагнічування при дії змінних магнітних потоків синусоїдальної форми в якості базової використовують наступну формулу

$$P_{\Sigma} = P_{\Pi B} \cdot V \cdot f ,$$

де $P_{\Pi B}$ - питомі втрати, що приведені до одиниці об'єму магнітного матеріалу (Вт/см³). Величини питомих втрат для різних магнітних матеріалів приводять в довідниковій літературі. Проте ці величини визначають для певних режимів перемагнічування з заданими значеннями частоти та максимальної індукції.

В практичних розрахунках застосовують формулу, яка дозволяє більш точно врахувати реальний режим перемагнічування

$$P_{\Sigma} = P_{\Pi B} \cdot V \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{B}{B_{max0}} \right)^{\beta} ,$$

де: f , B – частота та максимальна індукція робочого режиму; f_0 , B_{max0} – базові розрахункові параметри для яких у довідковій літературі визначене значення питомої об'ємної потужності втрат; α , β - показникові параметри, значення яких приводяться в довідниковій літературі.

У довідниковій літературі досить поширеним є використання величин питомих втрат, приведених до одиниці маси магнітного матеріалу. У цьому випадку розрахункова формула має наступний вигляд

$$P_{\Sigma} = P_{\Pi BM} \cdot G \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{B}{B_{max0}} \right)^{\beta} ,$$

де $P_{\Pi BM}$ - питомі втрати, що приведені до одиниці маси (Вт/кг), G – маса осердя. У табл.3 приведено дані які включають значення величин α , β та $P_{\Pi BM}$ для деяких магнітних матеріалів.

Таблиця 3

Марка матеріалу	Товщина стрічки, [мм]	Питомі втрати [Вт/кг]		a	b
		Форма сигналу			
		Синусоїдальна	Прямокутна		
34НКМП	0,1	2,7	2,2	1,65	1,7
	0,02	3,8	3,4	1,15	1,3
79НМ	0,1	1,4	1,2	1,65	2,0
	0,02	0,85	0,8	1,4	2,0
2000НМ1	-	-	21	1,25	2,6
2000НМ3	-	-	23	1,1	2,4

У разі дії змінних потоків форма яких відрізняється від синусоїдальної методика розрахунку втрат ускладнюється. У цьому випадку діючий сигнал розкладають у ряд Фур'є та проводять розрахунок потужності втрат для набору гармонік. В результаті такого розрахунку визначають потужність втрат по першій гармоніці та коефіцієнт додаткових втрат γ_ϕ , величина якого залежить від форми сигналу та вкладу вищих гармонік.

Потужність втрат у цьому випадку визначається наступним чином

$$P_\Sigma = P_{ПВМ} \cdot G \cdot \gamma_\phi.$$

5. Лабораторна робота №4 Дослідження способів зменшення індуктивності розсіювання.

1. Мета роботи: Визначити методом короткого замикання сумарну індуктивність розсіювання.

2. Програма роботи:

2.1 З'єднати макет з автотрансформатором, встановивши при цьому напругу на автотрансформаторі 0 В.

2.2 Увімкнути стенд.

2.3 Подати на автотрансформатор напругу від 0 до 150 В з кроком у 10 В.

2.4 Зняти залежність напруги вторинної обмотки від струму для кожної схеми ввімкнення трансформатора.

2.5 Встановити на трансформаторі напругу 220 В.

2.6 Визначити за допомогою осцилографа для кожного з способів підключення трансформатора зсув фаз між сигналами струму і напруги.

2.7 Замалювати отримані осцилограми.

3. Завдання:

3.1 По даним таблиці для кожного положення перемикача П1 побудувати графіки залежність $U_2(I_2)$.

3.2 Для кожного з способів підключення трансформатора визначити сумарну індуктивність розсіювання.

3.3 Обрати схему, яка має найменше значення параметру індуктивність розсіювання.

4. Опис експериментальної установки

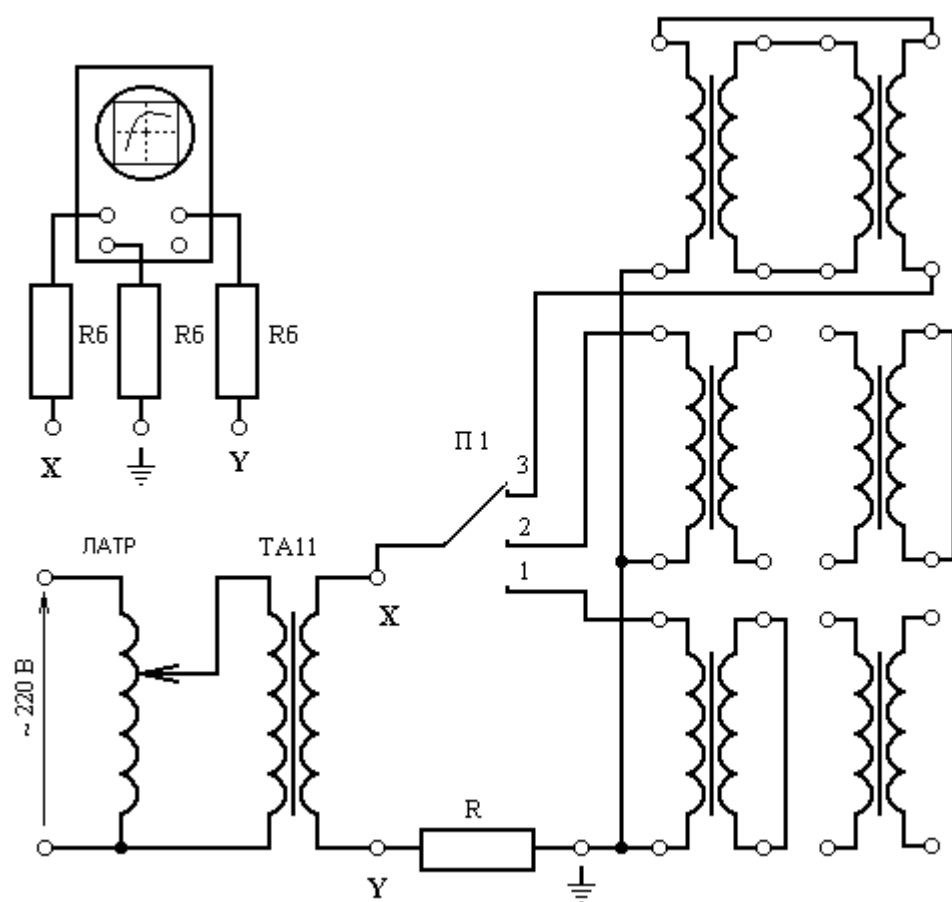


Рис.1

Табл. 1

П1	Вихідні параметри	Напруга на трансформаторі, В														
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120	130	140	150
1	U ₂ , В															
	I ₂ , А															
2	U ₂ , В															
	I ₂ , А															
3	U ₂ , В															
	I ₂ , А															

5. Зміст звіту

- 5.1 Мета роботи.
- 5.2 Схема вимірювальної установки.
- 5.3 Результати експериментів.
- 5.4 Розрахункові дані.
- 5.5 Висновки по роботі.

6. Контрольні запитання:

- 6.1 Еквівалентна схема трансформатора.
- 6.2 Еквівалентна схема трансформатора при короткому замиканні вторинної обмотки трансформатору.
- 6.3 Способи розміщення обмоток трансформатора на магнітопроводі.
- 6.4 Методи визначення індуктивності розсіювання.
- 6.5 Метод короткого замикання.
- 6.6 Конструктивні методи зменшення індуктивності розсіювання.
- 6.7 При якому включенні обмоток спостерігається найменша індуктивність розсіювання? Чому?

7. Література

- 7.1 Розрахунок електромагнітних елементів джерел вторинного електроживлення. А. Н. Горський,
- 7.2 Ю. С. Русин, Н. Р. Іванов, Л. А. Сергіїва.-М.: Радіо і* зв'язок, 1988.-176 з*.
- Вольдек А. І. ЕЛЕКТРИЧНІ машини.-М.: Енергія, 1974
- 7.3 Миловзоров В. П. Электромагнитные приборы автоматики-М.: Вища школа, 1983г.-408с.

8. Теоретичні відомості

1. ЕКВІВАЛЕНТНА СХЕМА ТРАНСФОРМАТОРА

Найпростіший трансформатор складається з двох обмоток, що намотані на магнітопровід. Первинна під'єднується до джерела напруги, вторинна - до навантаження (мал. 1.1). Згідно принципу Ленца включення обмоток трансформатора зустрічне. По схемі мал. 1.1 можна скласти рівняння:

$$u_1 = R_1 i_1 + (L_1 di_1/dt) - M di_2/dt; \quad (1.1)$$

$$0 = R_2 i_2 + (L_2 di_2/dt) - M di_1/dt + u_2 \quad (1.2)$$

Представимо їх у вигляді

$$u_1 = R_1 i_1 + (L_1 di_1/dt) - n M di_2/dt \cdot 1/n;$$

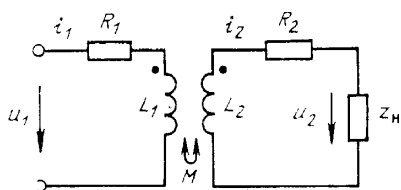
$$0 = n_2 R_2 i_2/n + n_2 (L_2 di_2/dt) \cdot 1/n - n M di_1/dt + n U_2$$

Де $n = \omega_1/\omega_2$ - коефіцієнт трансформації; $i_2/n = I_2$; $U_2 n = U_2'$; $R_2 n^2 = R_2'$; $L_2 n^2 = L_2'$ - параметри трансформатора, наведені по виткам до первинної обмотки.

Тоді

$$U_1 = R_1 i_1 + (L_1 di_1/dt) - n M di_2'/dt; \quad (1.3)$$

$$0 = R_2' i_2' + (L_2' di_2'/dt) - n M di_1/dt + u_2' \quad (1.4)$$



Мал. 1.1. Схема двохобмоточного трансформатора (r_1 , L_1 , r_2 , L_2 - активний опір і індуктивність первинної і вторинної обмоток відповідно; M коефіцієнт взаємної

індукції; Z_n — опір навантаження)

Якщо до правої частини рівняння (1.3) додати $nM di_1/dt - nM di_1/dt$, а до рівняння (1.4) $nM di_2'/dt - nM di_2'/dt$, отримаємо

$$u_1 = R_1 i_1 + (L_1 - nM) di_1/dt + nM d(i_1 - i_2)/dt; \quad (1.5)$$

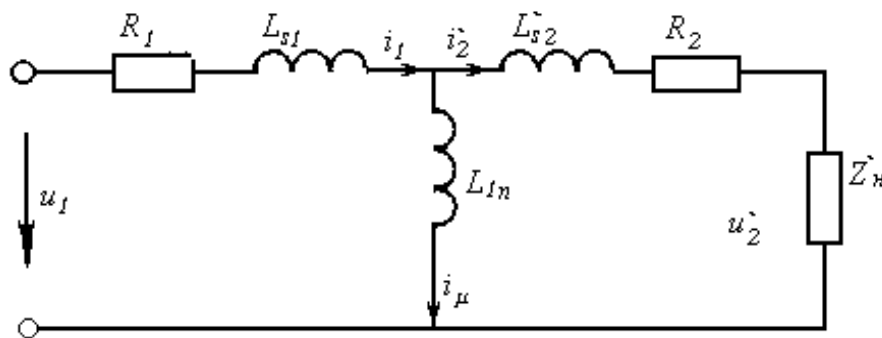
$$0 = R_2' i_2' + (L_2' - nM) di_2'/dt + nM d(i_1 - i_2)/dt + u_2'$$

Величину $(L_1 - nM) = L_{s1}$ називають індуктивністю розсіювання первинної обмотки, $(L_2' - nM) = L_{s2}$ - індуктивністю розсіювання вторинної обмотки, наведеної до первинних витків, $nM = L_1 - L_{s1} = L_{1n}$ - індуктивністю первинної обмотки, зумовленої основним магнітним потоком. При цьому еквівалентна схема, відповідна рівнянням (1.5), зображується згідно мал. 1.2. Помножимо (1.1) на i_1 , а (1.2) на i_2 , результати складемо. Тоді

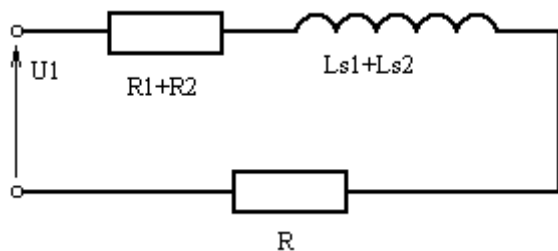
$$u_1 i_1 = R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2 + u_2 i_2 + L_{1n} i_1 di_1/dt + L_{s2} i_2 di_2/dt - M i_1 di_2/dt - M i_2 di_1/dt;$$

$$\text{Або } p_1 = R_1 i_1^2 + R_2 i_2^2 + p_2 + dW_m/dt. \quad (1.6)$$

Де $W_m = L_{1n} i_1^2/2 + L_{s2} i_2^2/2 - M i_1 i_2$ - енергія магнітного поля, що запасасться у будь-який момент часу в обмотках трансформатора.



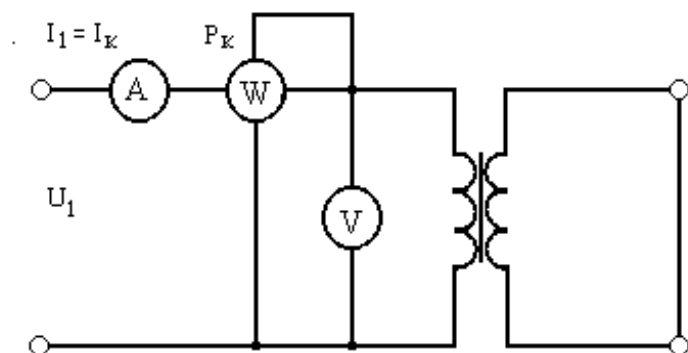
Мал. 1.2. Схема, еквівалентна схемі мал. 1.1 ($i = i_1 - i_2$ - струм намагнічування)



Мал. 1.3 Еквівалентна схема при короткому замиканні вторинної обмотки

2. КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ

Дослід короткого замикання проводиться по схемі мал 2.1. Вторинні обмотки замикаються на коротко, а до первинних обмоток для запобігання перегріву і пошкодженню трансформатора підводиться понижена напруга з таким розрахунком, щоб струм знаходився в межах номінального.



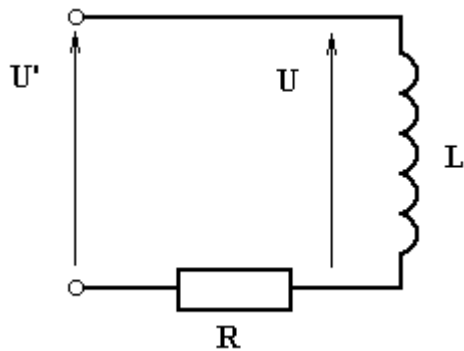
Мал. 2.1 Схема вимірювання дослід короткого замикання.

Повне Z_k , активний і реактивний опори короткого замикання розраховуються по формулам, аналогічним для випадку холостого ходу.

Для однофазного трансформатора

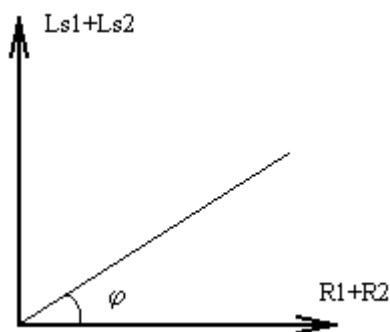
$$Z_k = U_k / I_k; r_k = P_k / I_k^2; X_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \quad (2.1)$$

Для знаходження $L_{s1} + L_{s2}$ необхідно знайти активні складові опору обмоток (R_1 і R_2), наприклад способом виміру падіння напруги на резисторі (мал. 2.2).



Мал. 2.2 Схема для виміру активного опору засобом виміру падіння напруги на резисторі

Після цього, необхідно виміряти зсув фаз між струмом і напругою (мал. 2.3).



$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L_{s1} + L_{s2}}{R_1 + R_2} \quad (2.2)$$

φ - кут зміщення фаз.

За допомогою рівняння (2.2) знаходимо сумарну індуктивність розсіювання обмоток трансформатора.

3. РОЗРАХУНОК ІНДУКТИВНОСТІ РОЗСІЮВАННЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

Однім з параметрів, визначаючих якість роботи трансформатора, є індуктивність розсіювання L_s . Існує багато різноманітних засобів розрахунку індуктивності розсіювання трансформаторів. Достатньо широке розповсюдження отримав метод В. Роговського. Метод заснований на побудові ідеалізованої картини магнітного поля обмоток трансформатора, що представляється лініями, які ідуть паралельно до утворюючих циліндричних обмоток. Вплив спотворення ходу магнітних силових ліній на величину L_s враховується так званим коефіцієнтом Роговського kR , що визначається по формулі

$$kR=1 - (b1+b2+b12)/\pi h, (3.1)$$

Де $b1, b2$ — товщина первинної і вторинної обмоток; $b12$ — відстань між ними; h - висота обмотки.

Величина L_s двохомоточного трансформатора з урахуванням (3.1) згідно вказаному методу обчислюється по вираженню

$$L_s = (kR * \mu_0) / h * \omega_1^2 l_{об} (b12 + (b1 + b2) / 3), (3.2)$$

μ_0 -магнітна постійна, рівна $4 * 10^{-9}$ Гн/см; ω_1 - кількість первинних витків; $l_{об}$ — середня довжина витка обмоток.

В останній час для визначення L_s широко використовується метод середньгеометрических відстаней. По цьому методу

$$L_s = (\mu_0 / 2\pi) * \omega_1^2 l_{об} \ln(g_{12}^2 / g_1 * g_2), (3.3)$$

g_{12} - середньгеометрична відстань між перерізу обмоток; g_1, g_2 — середньгеометричні відстані перерізів обмоток самих від себе.

Враховуючи ті обставини, що при виготовленні трансформаторів в реальних умовах можливі помітні відхилення геометричних параметрів обмоток від розрахункових, а також наявність в (3.3) логарифмічної функції, що мало впливає на незначні відхилення аргументу від номінального значення, можна використати прості вирази для визначення середньгеометричних відстаней. В якості таких спрощень виразів можуть бути прийняті наступні:

$$g_1 = 0,223 (h + b1); g_2 = 0,223 (h + b2); g_{12} = 0,223 h + 0,78 d, (3.4)$$

де $d = b12 + (b1 + b2) / 2$.

Якщо врахувати, що в трансформаторах $b1 \approx b2 = b$ и $b12 \ll b$, то (3.3) и (3.4) матимуть вигляд:

$$L_s = (kR \cdot \mu_0)/h \cdot \omega_l^2 l_{об} (b/12 + 2b/3) \approx (kR \cdot 2\mu_0)/3h \cdot \omega_l^2 l_{об} b \approx L_s = 2\mu_0/3h \cdot \omega_l^2 l_{об} b \quad (3.4a)$$

$$L_s = (\mu_0/\pi) \cdot \omega_l^2 l_{об} \ln(1 + (3.5d)/h / (1 + b/h)) \approx 2.5(\mu_0/\pi) \cdot \omega_l^2 l_{об} b/h \quad (3.4б)$$

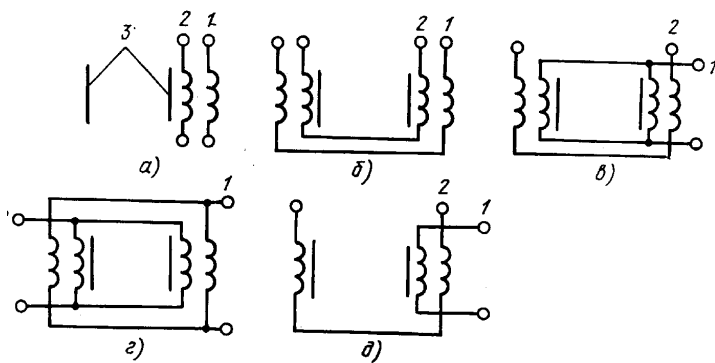
Безпосередні розрахунки показують, що обчислені по (3.4 а) і (3.4 б) значення L_s достатньо близькі одне до одного і, отже, визначення L_s може бути виконане по будь-якому з наведених виразів.

Існує безліч варіантів розташування обмоток на магнітопроводі, їхнього конструктивного виконання і схем сполучення. Найбільші можливості дасть стержнева конструкція трансформатора, виконана на магнітопроводнику, наприклад, типу ПЛ. На мал. 3.1 представлені найбільш типові схеми сполучення обмоток для стержневих трансформаторів (припускається що обмотки мають коаксіальну конструкцію).

Кожний тип схеми сполучення і розташування обмоток характеризується наступними особливостями:

1. Первинна і вторинна обмотки розташовуються на одному стрижні (мал. 3.1, а). В цьому випадку L_s визначається безпосередньо по формулам (3.4 а) і (3.4б).
2. Первинна і вторинна обмотки поділені на половини; кожна пара половин розміщена на одному стрижні, і половини з'єднані між собою послідовно (мал. 3.1, б). В цьому випадку L_s визначається по зазначеними вище формулам, але для обмоток, розташованих на одному стрижні, т. ч. для половинного числа витків. Після цього отримана величина подвоюється, оскільки таку ж індуктивність розсіювання будуть мати половини обмоток, розташовані на іншому стрижні. В результаті очевидно, що сумарна індуктивність розсіювання буде в два рази менше (при інших рівних умовах), ніж для випадку мал. 3.1, а.
3. Первинна обмотка складається з двох обмоток, розташованих на різних стрижнях і з'єднаних паралельно, а вторинна обмотка складається також з двох

половин, розташованих на різних стержнях, але з'єднаних між собою послідовно (мал. 3.1, в). Модифікацією цієї схеми є схема, зображена на мал. 3.1, г, де вторинна обмотка складається з двох обмоток, з'єднаних паралельно. При цьому індуктивність розсіювання в обох випадках для обмоток, розташованих на одному стержні, визначається по вже наведеним формулам для повного числа витків. Оскільки первинні обмотки з'єднані між собою паралельно (також будуть з'єднані і індуктивності розсіювання), та загальна індуктивність розсіювання трансформатора буде дорівнювати половині індуктивності розсіювання для обмоток, розташованих на одному стержні. Таким чином, схеми сполучення обмоток, наведені на мал. 3.1, б-г, дадуть приблизно однакову величину L_s , вдвічі меншу тієї, що одержується в схемі мал. 3.1, а.



Мал. 3.1. Варіанти схем сполучення і розташування обмоток: 1 — первинна обмотка; 2 — вторинна обмотка; 3 — магнітопровід

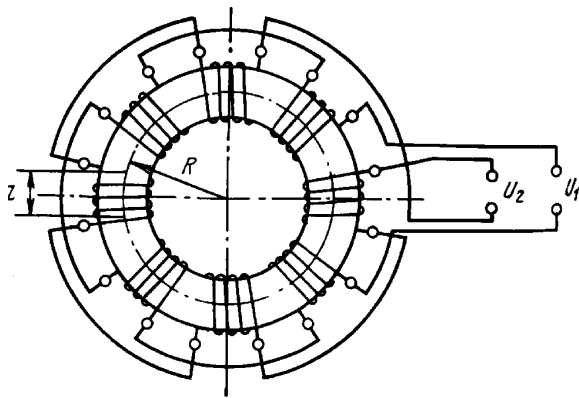
4. Первинна обмотка розміщена на одному стрижні, а вторинна поділена на дві половини, що розміщені на різних стержнях і з'єднані послідовно (мал. 3.1, д). Ця індуктивність визначається по загальній формулі

$$L_{sd} = 0,5 (L_{s12} + L_{s12'} + L_{s22'}),$$

Де L_{s12} , $L_{s12'}$ — індуктивності розсіювання між первинною обмоткою і секціями вторинної обмотки; $L_{s22'}$ — індуктивність розсіювання між секціями вторинної обмотки. Очевидно, що $L_{sd} > L_{sA}$ (L_{sA} — індуктивність розсіювання для схеми рис. 3.1, а).

Розглянутими випадками, звісна річ, не вичерпуються можливості варіювання L_s при певних розміщеннях обмоток.

Для значного зниження L_s застосовують секціювання обмоток. При цьому секції однієї обмотки розміщують між секціями іншої обмотки (чередуюча схема розташування обмоток). В реальних конструкціях трансформаторів число секцій значно піднімає ціну виготовлення трансформатора і знижує ступінь заповнення вікна магнітопровода міддю. Частини, на які поділяються обмотки, можуть мати в принципі різноманітні геометричні параметри.



Мал. 3.2. Торієдальний трансформатор з чередуючими секціями.

Розглянемо чередуючу систему секцій двохобмоточного трансформатора. Позначимо через s загальне число секцій, на що поділені первинна і вторинна обмотки. Тоді число так званих елементів m , т. ч. число частин обмоток, поділених лініями, відповідними нульовим значенням поля розсіювання в припущенні, що силові лінії магнітного поля ідуть паралельно, буде рівно $m=s-1$.

Слід відмітити, що число секцій (або галет при дисковій конструкції обмоток) повинно бути непарним, бо в протилежному випадку L_s сильно зростає. Крайні секції, мають кількість витків в два рази меншу в порівнянні з внутрішніми секціями. Індуктивність розсіювання секційної обмотки може бути визначена по формулі

$$L_s = (k'R*\mu_0*l_{об} \omega_l^2)/h*m^2 (b_\Sigma+(\Delta l+\Delta 2)/3), \quad (3.5)$$

Де $k'R$ коефіцієнт Роговського, рівний $k'R = 1 - 1(1 - e^{-\pi u})/\pi u$;

$$u = (\Delta l + \Delta 2 + \delta_\Sigma)^{-1} h;$$

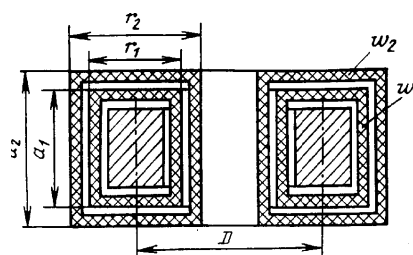
$\Delta 1, \Delta 2$ — повна товщина відповідно первинної і вторинної обмоток (з урахуванням розбивки на секції); δ_Σ повний зазор між секціями.

Для трансформаторів тороїдальної конструкції, що є чередуючими секціями первинної і вторинної обмоток (мал. 3.2.), L_s знаходиться по формулі:

$$L_s = (1.2\mu_0*l_{об} \omega_l^2)/N^{4/3} [1 + \ln \sqrt{(1+l/R)+A/3h}], \quad (3.6)$$

Де N — загальне число секцій (первинної і вторинної обмоток); A — середня товщина намотки секції (в напрямленні, перпендикулярному до середньої лінії тора), рівна $0.5 (A_1 + A_2)$; A_1, A_2 — товщина секцій первинної і вторинної обмоток відповідно; l — відстань між сусідніми секціями, заміряна вздовж середньої лінії тора; R — радіус середньої силової лінії магнітного поля в торі. Величина h визначається по формулі:

$$h = (2lR - Nl)/N.$$



Мал. 3.3. Тороїдальний трансформатор з обмотками, розташованими по всій поверхні магнітопровода.

Індуктивність розсіювання тороїдальних трансформаторів при не секційованих обмотках за умови, що останні розташуються по всій поверхні магнітопровода одна над іншою (мал. 3.3), визначається по формулі:

$$L_s = (\mu_0 / 2\pi) \cdot \omega_l^2 a^2 \ln[1 + 16Dr\Delta^2 / (D^2 - r^2)^2], \quad (3.7)$$

Де $a = 0,5 (a_1 + a_2)$; $r = 0,5 (r_1 + r_2)$; a_1, a_2 — аксиальні розміри середніх витків; r_1, r_2 — радіальні розміри середніх витків; D — середній діаметр тора; $\Delta = (r_2 - r_1)/2 = (r - r_1)/2$

Рекомендації по зменшенню індуктивності розсіювання в загальному вигляді сформулювати не представляється можливим. Це можна пояснити наступним. Величина індуктивності розсіювання, передусім, залежить від конструкції трансформатора. Тому можна порівнювати і робити однозначні висновки тільки для трансформаторів конкретного типу (стержневих, броньових, тороїдальних). Крім того, слід мати на увазі ту обставину, що зниження L_s не є самоціллю. Як правило, водночас з цим вимагається зменшувати і інші, так звані, паразитні параметри трансформатора (наприклад, власну ємність C_0). Для більшості типів конструкцій трансформаторів заходи, направлені на зменшення L_s , призводять до збільшення власної ємності C_0 . На практиці потрібно виходити не тільки з умови мінімуму L_s і C_0 , але і цілого ряду інших вимог (мінімальних габаритів, вдалої компоновки, отримання мінімальних полів розсіювання, найкращого відведення тепла і т. п.).

6. Лабораторна робота №5 Дослідження власних ємностей трансформатора.

1. Мета роботи

- З'ясувати вплив форми магнітних сердечників на власну ємність трансформаторів.
- Встановити вплив числа витків обмотки на її ємність.
- Визначити вплив способу намотки обмотки на ємність трансформатора.

2. Програма роботи

2.1 Ознайомитися з макетом лабораторної роботи (Рис.1). Усвідомити призначення елементів схеми.

2.2 Увімкнути вимірювальний міст для прогріву (10 – 15 хв.).

2.3 Виміряти часткові ємності кільцевого трансформатора:

- ємність C_{W1-M} між магнітопроводом і первинною обмоткою (клеми X1 і X2, при цьому врахувати, що магнітопровід замінений екранною обмоткою);
- ємність C_{W1-W2} між первинною і вторинною обмотками (клеми X2 і X3).

2.4 Виміряти часткові ємності першого броньового трансформатора:

- ємність C_{W1-M} між магнітопроводом і первинною обмоткою (клеми X5 і X4, магнітопровід замінений екранною обмоткою);
- ємність C_{W1-W2} між первинною і вторинною обмотками (клеми X4 і X7).

2.5 Всі вимірювання провести 8 – 10 разів та визначити середні значення. Результати вимірів занести до табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Номер досліджу	Вид вимірюваної ємності				
	C_{W1-M} , [пФ]		C_{W1-W2} , [пФ]		
	Кільцевий	Броньовий 1	Кільцевий	Броньовий 1	Броньовий 2
Середні значення					

2.6 Дослідити вплив кількості витків обмоток на величину ємності між первинною та вторинною обмотками. Для цього необхідно провести виміри часткової ємності C_{w1-w2} другого броньового трансформатора (клеми X8 і X9) і порівняти цю ємність з аналогічною для кільцевого і першого броньового трансформаторів. При цьому врахувати, що кількість витків первинної обмотки кільцевого сердечника дорівнює кількості витків як первинної так і вторинної обмоток другого броньового трансформатора. Результати вимірів занести до таблиці.

2.7 Дослідити вплив способу укладення обмоток на величину ємності між обмотками. Зробити виміри ємності між первинною (екранною) та вторинною обмотками для послідовного рядового та зустрічного способів укладки вторинної обмотки.

- Для дослідження ємності при послідовному рядовому способі укладки обмотки необхідно встановити перемикач у положення 2. Послідовно включаються обмотки 1 і 2. Виміряти ємність між клемми X5 та X7.
- Для дослідження ємності при зустрічному способі укладки обмотки необхідно встановити перемикач у положення 3. Виміряти ємність між клемми X5 та X7.

2.8 Визначити власні ємності трансформаторів по формулі (1):

Для стрічкової обмотки:

$$C = 1,26 \cdot 10^{-11} \cdot V_M^{1/3} \cdot (3,2 \cdot (W2/W1)^2 + (1 - W2/W1)^2 \cdot 1,26 \cdot V_M^{1/3}),$$

(1)

Де C - ємність, Ф; V_M – об'єм магнітопроводу над яким розташована обмотка, см^3 ; $\epsilon_r \approx 4$; $r = 0,25$ мм; $a = 0,3$ мм;

Порівняти розрахункові результати з експериментальними.

2.9 Скласти схему заміщення трансформаторів з врахуванням виміряних ємностей.

2.10 Оцінити вплив форми магнітопроводу на власні ємності трансформатора.

3. Опис експериментальної установки

Схему експериментальної установки наведено на рис.5.1.

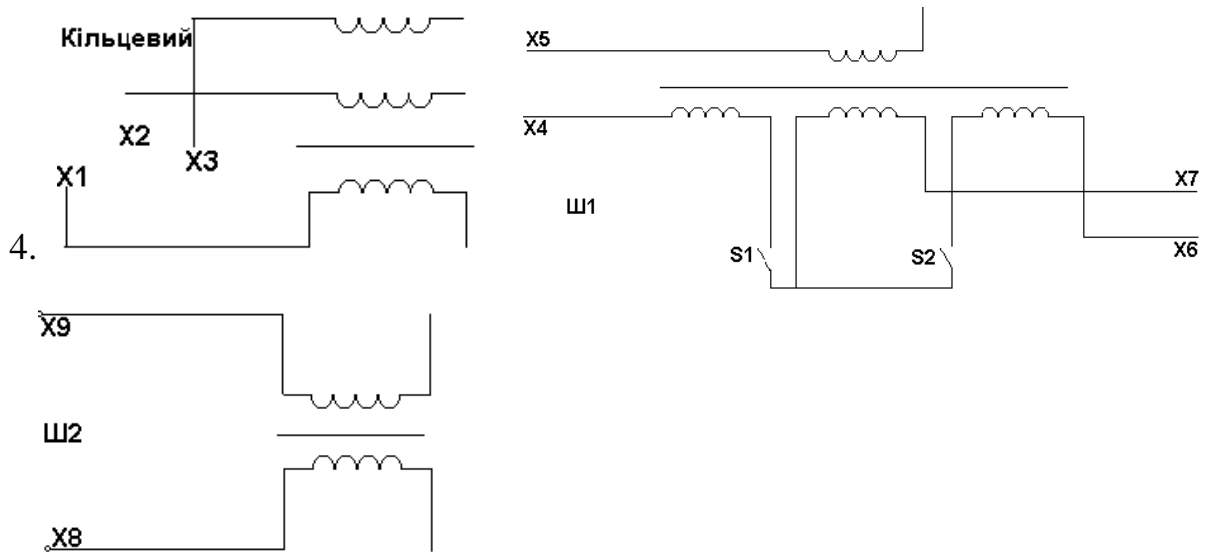


Рис. 5.1 Схема експериментальної установки

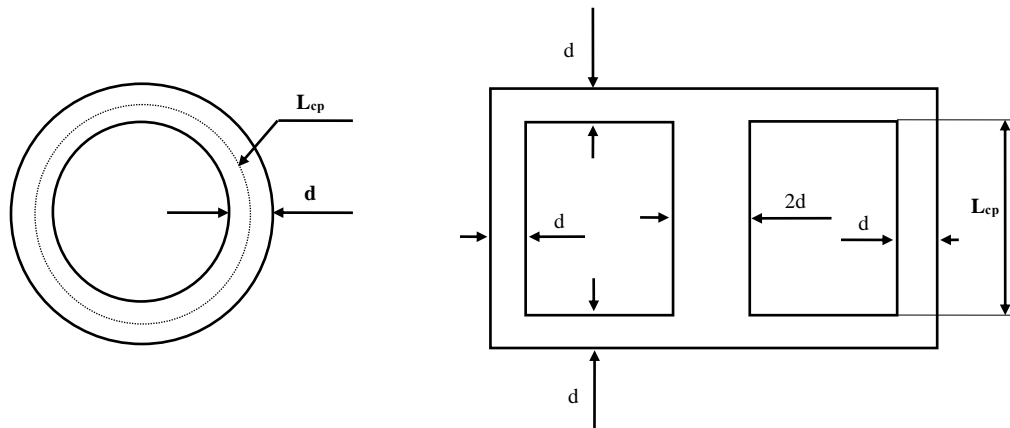


Рис. 5.2 Параметри магнітопроводів кільцевого та броньового сердечників

Параметри магнітопроводів трансформаторів:

- розміри магнітопроводів кільцевого та броньового сердечників

$L_{cp}=12,5$ см; $d=1,5$ см; товщина магнітопроводів $h=1$ см;

- кількість витків первинної обмотки $W_1=260$ та вторинної $W_2=340$. На кільцевому магнітопроводі обмотка розміщена рівномірно по всій довжині кільця. На броньовому трансформаторі обмотки розміщені на ділянці L_{cp} .

4. Зміст звіту

- 4.1 Титульний лист із назвою роботи.
- 4.2 Мета роботи.
- 4.3 Схема експериментальної установки.
- 4.4 Результати вимірів.
- 4.5 Розрахункові дані.
- 4.6 Висновки по роботі.

5. Контрольні запитання

- 5.1 Визначити необхідність використання топологічно рівних трансформаторів під час вивчення складових власної ємності.
- 5.2 Дати визначення власної ємності трансформатора, її складових, Привести еквівалентну схему заміщення трансформатора.
- 5.3 Визначити методику приведення ємностей трансформатора до витків первинної обмотки.
- 5.4 Пояснити вплив типу намотування на міжшарові ємності трансформатора.

6. Література

- 6.1 Горский А.Н., Русин Ю.С., Иванов Н.Р., Сергеева Л.А. Расчет электромагнитных элементов источников вторичного электропитания. - М.: Радио и связь, 1988.
- 6.2 Русин Ю.С. Трансформаторы звуковой и ультразвуковой частоты. - Л.: Энергия, 1973.

7. Теоретичні відомості

Крім індуктивності розсіювання, іншим важливим параметром для трансформаторів є власна ємність обмоток. У загальному випадку власна ємність обмоток складається з ємностей між внутрішнім шаром обмотки і магнітопроводом - C_1 ; між шарами обмотки - C_2 ; та між обмотками - C_3 . Крім

зазначених складових повної власної ємності, існують: ємність між зовнішнім шаром обмотки й екраном (кожухом); ємність монтажу і виводів.

Під час аналізу різних схем з'єднання обмоток (чи їхніх частин) трансформатора користуються інтегральним значенням ємності, що умовно підключається до вхідних виводів. Значення такої еквівалентної ємності визначається з умови рівності електричної енергії, зосередженої у зазначеній ємності та її складових. Поділ же загальної ємності обмоток на окремі складові (часткові ємності) зручно, тому що це дозволяє аналізувати складні схеми з'єднання обмоток. Приведення окремих часткових ємностей до вхідних виводів конкретної обмотки виконується за загальною формулою:

$$C' = C f(w/w_n),$$

де C' - приведення до виводів обмотки значення часткової ємності C , реально підключеної до w її витків; w_n - повне число витків обмотки; $f(w/w_n)$ - функція приведення.

При визначенні повної власної ємності, не обов'язково наявність усіх видів часткових ємностей для кожної обмотки. Наприклад, якщо первинна обмотка намотується на магнітопровід, а вторинна розташовується зверху первинної, то первинна обмотка буде мати ємності C_1 і C_2 , а вторинна — тільки C_2 ; оскільки її внутрішній шар не стикається з магнітопроводом (замість цієї ємності присутня C_3 , тобто міжобмоткова (прохідна) ємність. Інакше кажучи, при аналізі еквівалентної схеми трансформатора в схему заносяться тільки ті часткові ємності, що реально можуть існувати в розглянутій моделі трансформатора.

Вид функції приведення $f(w/w_n)$ визначається видом часткової ємності:

- для C_1 $f(w/w_n) = (w/w_n)^2$, де w - число витків у шарі обмотки, найближчому до магнітопроводу; w_n — повне число витків обмотки;
- для C_2 $f(w/w_n) = (w/w_n)^2$;
- для C_3 $f(w/w_n) = (1 - w_2/w_1)^2$, де w_1 — число витків обмотки, до зажимів якої приводиться ємність C_3 ; w_2 — число витків іншої обмотки.

Якщо є дві індуктивно зв'язані обмотки (w_1 і w_2), то для приведення ємності Z , що вже приведена попередньо до виводів обмотки w_2 , до обмотки w_1 використовується формула $f(w_1/w_2) = (w_2/w_1)^2$. Звідси випливає, що для понижуючого трансформатора ($w_2 < w_1$) повна ємність вторинної обмотки зменшується, при приведенні її до первинних витків (для підвищувального трансформатора – навпаки).

Для визначення часткових ємностей можна використовувати наступні формули [2]:

- ємність між першим шаром обмотки і магнітопроводом:

$$C_1 = 8\epsilon_r \epsilon_0 r l_{06} n / (4a - pr) \quad (\text{рядове намотування})$$

$$C_1' = \epsilon_r \epsilon_0 b l_{06} / a \quad (\text{намотування стрічкою})$$

$$C_1'' = 8\epsilon_r \epsilon_0 r l_{06} m' / (4a - pr) \quad (\text{намотування типу "піраміда"}),$$

де: ϵ_r — відносна діелектрична проникність ізоляції (для більшості ізоляційних матеріалів $\epsilon_r = 3 \dots 4$); ϵ_0 - електрична постійна, рівна $8,85 \cdot 10^{-14}$ Ф/см; r - радіус неізольованого проводу, см; l_{06} - середній периметр витка, см; a - відстань між магнітопроводом і віссю проводу, см; b — ширина стрічки, см; n — число витків у першому шарі; m' - число "косих шарів" піраміди;

- ємність між шарами, приведена до вивідних кінців обмотки:

$$C_2 = 4\epsilon_r \epsilon_0 r n l_{06} / ((4a_1 - pr)(m-1)) \quad (\text{рядове намотування});$$

$$C_2' = \epsilon_r \epsilon_0 b l_{06} / (2a_1(m-1)) \quad (\text{намотування стрічкою});$$

$$C_2'' \approx 0 \quad (\text{намотування типу "піраміда"}),$$

де: m - число шарів; $2a_1$ - відстань між осями витків проводу чи витками стрічки в сусідніх шарах, см;

- ємність між обмотками:

$$C_3 = 4\epsilon_r \epsilon_0 r_{cp} n_{cp} l_{06} / (4a_2 - pr_{cp}),$$

де: r_{cp} - середній радіус оголеного проводу суміжних обмоток, см; n_{cp} - середнє число витків у суміжних шарах обмоток; $2a_2$ - відстань між осями проводів суміжних шарів сусідніх обмоток.

Діелектрик, що заповнює простір між витками й обмотками, не є однорідним. Це пояснюється тим, що, по-перше, просочення електроелементів у виробничих умовах не забезпечує повної відсутності повітря в діелектрику і, по-друге, сама ізоляція являє собою сукупність різнорідних матеріалів (ізоляція проводу, просочувальний матеріал, повітря і т.д.). Крім того, при виготовленні електроелементів можуть бути повітряні включення. Необхідно, однак, відзначити, що наявність повітряних включень, з одного боку, знижує електричну міцність ізоляції, але, з іншого боку, відіграє позитивну роль для зменшення еквівалентної діелектричної проникності ізоляцій, тобто зменшення ємності. Таким чином, виконавши розрахунок власної ємності в припущенні ідеального заповнення ізоляційним матеріалом обмоток трансформатора, можна одержати гарантію, що ємність конкретного зразка не буде перевищувати розрахункову величину. Еквівалентне значення відносної діелектричної проникності композиції n діелектриків можна оцінити за наступною формулою:

$$\epsilon_3 = 2 * \frac{\sum_{k=1}^n \epsilon_{rk} V_k \sum_{k=1}^n V_k}{\left(\sum_{k=1}^n V_k \right)^2 + \sum_{k=1}^n \epsilon_{rk} V_k \sum_{k=1}^n \frac{V_k}{\epsilon_{rk}}}$$

де ϵ_{rk} - відносна діелектрична проникність діелектрика, що має об'єм V_k .

Приведені формули, що визначають часткові ємності обмоток, отримані при розгляді ідеалізованої картини поля в міжвитковому просторі. Ці вирази дозволяють обчислити так називані статичні ємності.

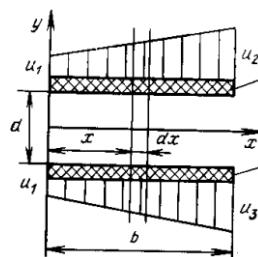


Рис. 3. Розподіл напруги вздовж суміжних шарів обмотки

Якщо виходити з енергетичних розумінь, тобто повну власну ємність знаходити з умови рівності енергії, запасеної в часткових і в еквівалентній ємності, то можна визначити динамічну ємність системи. Варто помітити, що значення статичної і динамічної ємностей становлять величини одного порядку. Другий шлях, на наш погляд, є більш правильним. Відзначимо, що динамічна ємність пропорційна статичній ємності. Вважаючи, що потенціал уздовж шару обмотки змінюється за лінійним законом (що досить близько до дійсного розподілу), визначаємо динамічну ємність між двома суміжними шарами обмоток. На рис. 3 зображені два суміжних шари обмоток 1 і 2. Потенціали уздовж кожного шару змінюються лінійно (для шару 1 потенціал змінюється від u_1 до u_2 , для шару 2-від u_3 до u_4).

Різниця потенціалів між симетричними витками в шарах буде визначатися вираженням

$$Du(x) = x \cdot (u_2 - u_3 - (u_1 - u_4)) / b + u_1 - u_4$$

Напруженість електричного поля між елементами dx кожного шару буде дорівнювати $E(x) = Du(x)/d$. Енергія, запасена в міжшаровім просторі, визначиться як

$$W = \epsilon_a \int_0^b 0.5 \cdot E^2 dV = \frac{\epsilon_a l b}{6d} ((u_2 - u_3)^2 + (u_1 - u_4)^2 + (u_2 - u_3)(u_1 - u_4)) = C_0 k,$$

де $C_0 = \epsilon_a l b / d$ — статична ємність; l - периметр витка.

Оскільки u_1, u_2, u_3, u_4 можна виразити в частках від деякої базової напруги u_0 (наприклад, напруги первинної обмотки, до якого приводяться всі часткові ємності), то, враховуючи, що $u_1 / u_0 = m_1, u_2 / u_0 = m_2, u_3 / u_0 = m_3, u_4 / u_0 = m_4$, одержимо

$$k = ((m_2 - m_3)^2 + (m_1 - m_4)^2 + (m_2 - m_3)(m_1 - m_4)) / 6 .$$

Можна показати, що при рядовому намотуванню обмоток трансформатора міжшарова власна ємність не залежить від числа витків, шарів і параметрів проводу і визначається тільки параметрами обмотки. Для цього

приведемо наступні міркування. Позначимо площу перетину обмотки $S_{об}$, площу сумарного перетину міді $S_{м.про.}$. Тоді коефіцієнт заповнення міддю перетину обмотки буде дорівнювати $км = S_{м.про.} / S_{об}$, (a, h - ширина і висота перетину $S_{об}$). При цьому, якщо діаметр проводу обмотки d , одержимо

$$S_{м.про.} = mnpd^{2/4}, \text{ де } m, n — \text{число шарів і витків у шарі відповідно.}$$

Якщо в шарі витки розташовуються щільно один до одного (що звичайно виконується на практиці), то $n = h/d$. Звідки $км = S_{м.про.} / S_{об} = mpd/4a$. Відстань між шарами проводів в обмотці буде дорівнювати $d = (a - md)/(m - 1) = a(1 - 4км/p) / (m - 1)$. Ємність між шарами визначиться як $C = \epsilon_r \epsilon_0 h l_{об} / d$. Приведена до вхідних зажимів міжшарова власна ємність

$$C' = \frac{C}{m - 1} = \frac{1}{m - 1} \epsilon_r \epsilon_0 h l_{об} \frac{m - 1}{a(1 - 4км / \pi)} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 h l_{об}}{a(1 - 4км / \pi)}.$$

З цієї формули видно, що міжшарова ємність не залежить від числа шарів і витків, а також від параметрів проводу. Ця ємність пропорційна ємності конденсатора, у якого площа пластин дорівнює добутку висоти обмотки на середній периметр витка, і обернено пропорційна відстані між пластинами, рівному ширині обмотки. Коефіцієнт пропорційності $(1 - 4км/p)^{-1} = 1.46$ (при $км = 0.25$).

Слід зазначити, що знайдена ємність є основною складовою ємності повітряних циліндричних котушок індуктивності. Повна ємність повітряних котушок

$$C = \frac{\epsilon_0 h l_{об}}{a(1 - 4км / \pi)} + 1.8 \epsilon_0 l_{об} \approx \epsilon_0 l_{об} (1.8 + 1.47 h/a)$$

Використавши наближені співвідношення, можна навести наступну оціночну формулу для визначення власної ємності трансформатора (за умови концентричного розташування обмоток без секціонування і спеціальних способів з'єднання обмоток):

$$C = 1.26 * 10^{-11} V_m^{1/3} (3.2 * (w_2/w_1)^2 + (1 - w_2/w_1)^2 * 1.26 * V_m^{1/3}),$$

де: C - ємність, Ф; V_m — об'єм магнітопроводу, см^2 . Ця формула дозволяє одержати тільки орієнтовне значення ємності.

Описаний вище метод визначення власної ємності трансформатора (індуктивного елемента) дозволяє вирішити важливе питання щодо впливу секціонування на величину цієї ємності. У книзі Русина Ю.С. "Трансформаторы звуковой и ультразвуковой частоты" це питання докладно проаналізоване й отримані наступні результати: а) для секціонованих обмоток міжшарова ємність зменшується в k^2 разів (k — число секцій; б) при великому числі секцій, приведена до входу ємність між внутрішнім (першим) шаром і магнітопроводом прямує до $C_{1/3}$ (C_I -ємність несекціонованої обмотки).

Таким чином, якщо число шарів обмотки $m \geq 2$, приведена до входу ємність між магнітопроводом і внутрішнім шаром у секціонованої обмотки більше, ніж у несекціонованої. Дійсно, у секціонованій обмотці ця ємність не менше $C_{1/3}$, а для несекціонованої $C_I/m^2 \leq C_{1/4}$. У той же час міжшарова ємність, навпаки, у секціонованої обмотки менше, ніж у несекціонованої. Звідси можна зробити висновок, що секціонування обмоток з метою зменшення повної власної ємності вигідно використовувати тільки в тих випадках, коли міжшарова ємність значно перевищує ємність між внутрішнім шаром і магнітопроводом. У реальних конструкціях досить часто міжшарова ємність менше ємності C_I . Цим, зокрема, пояснюється відомий висновок про те, що секціонування обмоток приводить до збільшення власної ємності трансформатора. Як видно зі сказаного, цей висновок не є загальним і в деяких випадках можливе зменшення власної ємності трансформатора.

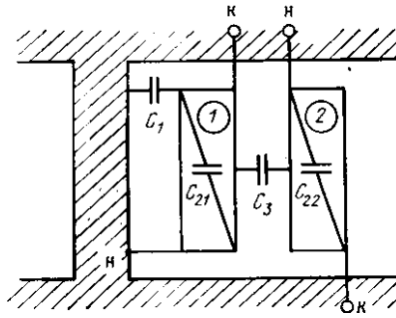


Рис. 4. Складові ємності обмоток у броньовому трансформаторі

Особливий інтерес становлять трансформатори тороїдальної конструкції що чергуються із секціонованими обмотками (мал. 4). Використавши основні теоретичні положення, викладені тут, можна одержати формулу для розрахунку власної ємності трансформаторів зазначеного типу:

$$C = (C_{21} + 0.5 C_3 (1 - w_2/w_1)^2 + 2 C_{22} (w_2/w_1)^2) / N$$

де C_{21} і C_{22} — міжшарові ємності секцій первинної і вторинної обмоток, отримані з наведеного вище виразу; N — загальне число секцій (первинної і вторинної обмоток); C_3 — ємність між секціями, що дорівнює:

$$C_3 = \epsilon_{\text{reol}} l_{\text{по}} \frac{(q + g)}{2b} ;$$

b - відстань від внутрішнього шару обмотки до магнітопроводу, см; $2q$ і $2g$ - ширина секції (по середній лінії магнітопроводу) первинної і вторинної обмоток.

При намотуванні секцій в один шар

$$C = \frac{C_3}{2N} (1 + w_2/w_1)^2.$$

Розрахунок власної ємності трансформаторів (і індуктивних елементів) доцільно робити, дотримуючись наступної послідовності операцій: а) на схематичне креслення конструкції трансформатора наносять всі часткові ємності, що мають фізичний сенс. При цьому необхідно звертати особливу

увагу на правильне з'єднання кінця і початку обмоток, напрям зміни потенціалу і т.д.; б) складається електрична схема обмоток трансформатора, тобто схема з'єднання відповідних часткових ємностей і індуктивностей; в) отримана вихідна схема шляхом послідовних спрощень за допомогою формул приведення (функції $f(w/w_n)$) перетвориться в елементарну схему, що являє собою паралельне з'єднання повної власної ємності трансформатора й індуктивності первинної обмотки.

Отже, власна ємність може бути зменшена за рахунок: спеціальних видів намотування (в один шар, «пірамідою», щільним укладанням витків один до одного, багат шарово з малим числом витків у шарі); конструктивних заходів (секціонування, використання перфорованих каркасів, що зменшують еквівалентну діелектричну проникність завдяки наявності повітряних включень; збільшенню товщини каркасів); використання діелектриків з малою ϵ_r ; електростатичних екранів (можливе розташування екранів усередині обмотки); місце приєднання екрана повинно визначитися шляхом відповідного аналізу за наведеним вище методом; тороїдальних конструкцій із секціонованими обмотками; збільшення міжобмоткових відстаней, а також за рахунок раціональної схеми заземлення кінців обмоток.

Зазначені рекомендації не завжди приводять до поліпшення інших параметрів трансформаторів. Тому проектування трансформаторів завжди повинне носити компромісний характер із метою отримання оптимального варіанта конкретного зразка.

Зміст

	Стор.
Вступ	4
1. Загальні положення.....	5
2. Лабораторна робота №1 Дослідження постійного магнітного поля	8
3. Лабораторна робота №2 Перевірка законів Ома та Кірхгофа у розгалуженому магнітному ланцюзі	19
4. Лабораторна робота №3 Дослідження характеристик магнітного сердечника.....	28
5. Лабораторна робота №4 Дослідження способів зменшення індуктивності розсіювання	42
6. Лабораторна робота №5 Дослідження власних ємностей трансформатора	55